汉译世界学术名著丛书

计算机与人脑

〔美〕约·冯·诺意曼 著



汉译世界学术名著丛书

计算机与人脑

〔美〕约·冯·诺意曼 著

甘子玉 译



商务印书馆

2001年·北京

汉译世界学术名著丛书

计算机与人脑

〔美〕约·冯·诺意曼著

甘子玉译

商务印书馆出版
（北京王府井大街36号 邮政编码 100710）
商务印书馆发行
北京冠中印刷厂印刷
ISBN 7-100-03244-X/B·490

1965年3月第1版　　开本 850×1168 1/32
2001年4月北京第3次印刷　　印张 2 1/4 插页 4

定价：7.00元

内容提要

这本书是自动机(以电子计算机为代表)理论研究中的重要材料之一。原书是冯·诺意曼在1955—1956年准备讲演用的未完成稿。著者从数学的角度，主要是从逻辑和统计数学的角度，探讨计算机的运算和人脑思维的过程，进行了一些比较研究。书中的许多技术推论带有预测性，尚待今后实验研究及进一步探讨才能判断其是否正确。至于书中的一些理论概括，其哲学观点是错误的，希望读者以分析、批判的态度来研究。

本书适合于自动机理论、控制论、计算技术和仿生学等方面的读者参考，对控制论问题有兴趣的哲学工作者，也可以阅读本书提供的材料。

汉译世界学术名著丛书
出版说明

我馆历来重视移译世界各国学术名著。从五十年代起，更致力于翻译出版马克思主义诞生以前的古典学术著作，同时适当介绍当代具有定评的各派代表作品。幸赖著译界鼎力襄助，三十年来印行不下三百余种。我们确信只有用人类创造的全部知识财富来丰富自己的头脑，才能够建成现代化的社会主义社会。这些书籍所蕴藏的思想财富和学术价值，为学人所熟知，毋需赘述。这些译本过去以单行本印行，难见系统，汇编为丛书，才能相得益彰，蔚为大观，既便于研读查考，又利于文化积累。为此，我们从 1981 年至 1998 年先后分八辑印行了名著三百四十种。现继续编印第九辑。到 2000 年底出版至三百七十种。今后在积累单本著作的基础上仍将陆续以名著版印行。由于采用原纸型，译文未能重新校订，体例也不完全统一，凡是原来译本可用的序跋，都一仍其旧，个别序跋予以订正或删除。读书界完全懂得要用正确的分析态度去研读这些著作，汲取其对我有用的精华，剔除其不合时宜的糟粕，这一点也无需我们多说。希望海内外读书界、著译界给我们批评、建议，帮助我们把这套丛书出好。

商务印书馆编辑部

2000 年 6 月

譯 者 序

人类的劳动和智慧，創造了机器。机器是人手的延长。最近大約二十年来出現的現代自动控制技术（其中以大型的电子計算机为最典型），也是人手和人脑的劳动产物，它們能够对思惟的某些特征进行模拟，代替了人脑的某些思惟功能，可以說，它們也是人脑的"延长"。在科学技术上，把以电子計算机为代表的自动机来和人脑作比較探討，是自动机理論研究中的一个重要方面，对自动机的研究設計有帮助（当然，应該牢記，两者有着本质的区别）。同时，这些比較研究，对于探索人脑思惟的活动过程，也可能有一定意义。

《計算机和人脑》一书，是这方面研究的重要材料。著者馮·諾意曼是这个研究領域的开拓者之一，在本书中，他企图对他自己的和其他人的有关研究成果进行概括。本书共分两部分。第一部分讲計算机，概述模拟計算机和数字計算机的一些最基本的設計思想和理論基础，探討其中的若干問題，幷对这两类計算机的特征及其比較，加以評述。第二部分讲人脑，著者从数学的角度，主要是从邏輯和統計数学的角度，討論了神經系統的刺激-反应和記忆等問題，提出神經系統具有数字部分和模拟部分两方面的特征，探討了神經系統的控制及邏輯結构。所有这些討論，都注意了拿人造的自动机（計算机）和"天然的自动机"（人脑）来作技术比較。他认为，人脑的"邏輯深度"和"算术深度"都比計算机小得多，但有許多現代計算机所不能比拟的优越性。比如，同样容积的神經元比人造元件能完成更多的运算，能同时处理更多的信息，記忆容量也大

得多，每个神經元件的准确度較低而其綜合的可靠性較高等等；人脑和計算机，无論在控制或邏輯結构上，都有巨大区別。通过这些比較和探討，提出了一些富于启发性的、值得进一步进行实驗和理論探討的問題。在这些方面，可供对自动机理論、控制論、計算技术、仿生学等有兴趣的讀者批判地参考。当然，书中的許多議論是預測性的，随着对人脑思惟过程和自动技术的研究成果之增加，肯定会有許多預測需要更改。

应該指出，近年来，围繞着自动技术的新成就和自动机理論的发展，产生了一股反动的思潮。資产阶級的"思想家"們(其中也有自然科学家)，歪曲和利用这方面的成就，把人脑和自动机等同起来，鼓吹"机器能够思惟"、"出現了有生命、有意識、有理智的机器"、"机器比人聪明"、"人类将被机器統治"等等謬論，作出种种反动的、謬誤的哲学概括和社会政治方面的結論。我們应該以馬克思列宁主义为武器，和这些反动思潮作斗爭，彻底批判这些反动思想；同时，对自动控制技术和自动机理論研究的成果，作出正确的哲学評价和社会政治結論，以促进这些新兴科学技术的健康发展。

馮·諾意曼在本书中，虽然还沒有作出直接的社会政治結論，可是在若干理論概括中，其哲学观点是錯誤的。例如，馮·諾意曼在作了人脑和計算机的各种技术上的比較后，作出这样的推論：既然神經系統和計算机的邏輯結构有很大区別，那么，我們現在所用的邏輯和数学，也就和語言一样，同是历史的、偶然的表达形式(参閱本书第十六章)。譯者认为这个推論是謬誤的。因为邏輯思惟的形式，不是人們主观任意的产物，而是客观物质世界中各种事物的一定关系在人脑中的反映*。这些思惟的形式，固然有必要借助

---

* 当然，邏輯只是思惟的規律。它們不是物质过程的規律，而是物质过程的反映之規律。如果思惟的材料是不符合事实的，思惟再合乎邏輯，也只能得到錯誤的結果。

于語言来表达、来形成，同一思想也可以用不同語言来表达、来形成，但是，其思惟規則却是同一的。馮·諾意曼的这个錯誤推論，和唯心主义的邏輯实证主义很相似。邏輯实证主义者认为：邏輯的規律、規則，是一种“純粹”思惟的假定与任意的产物，它和对客观現实的认識无关，只是一种人为的設置。譯者希望，本书能为研究控制論哲学問題的讀者，提供一份分析、批判的素材。

本书根据耶魯大学出版社一九五八年版譯出。原书是馮·諾意曼为耶魯大学西利曼讲座(Silliman Lectures)准备的讲稿。讲座原定在1956年春举行，因馮·諾意曼患病并于1957年春病故，这个讲稿沒有写完，因此这是一本未完成的稿子。在讲稿的許多地方，并沒有把意思展开和解释清楚。譯者虽然力求确切地翻譯，但原书內容涉及計算技术、数学、神經生理学等許多方面，因限于水平，譯文中錯誤与不确切之处定必难免，欢迎讀者予以指正。

原书冠有馮·諾意曼妻子所写的紀念性的序言，因与本书內容无关，不附在这个譯本中。但序中追述了馮·諾意曼的一些經历情况，对分析他的学术思想可能有些用处，譯者再参照别的书籍，据而編写了一份不完备的材料，作为本书附录，以供讀者参考。

譯　者

1999年

目　次

第二部分　人脑

引　　言

由于我既不是一个神經学专家，又不是精神病学家，而是一个数学家，所以，对这本书需要作若干解释与申明。本书是从数学家的观点去理解神經系統的一个探討。然而，这个陈述中的各个要点，都必須立即予以界說。

首先，我說这是企图对理解神經系統所作的探討，这句話还是夸张了。这只不过是多少系統化了的一組推測，預測应該进行怎样的探索。这就是說，我企图揣測：在所有以数学为引导的各研究途徑中，从朦朧不清的距离看来，哪些途徑是先驗地最有希望的，哪些途徑的情况似乎正相反。我将同时为这些預測提供某些合理化的意見。

其次，对于"数学家的观点"这个詞，我希望讀者作这样的理解：它的着重点和一般的說法不同，它幷不着重一般的数学技巧，而是着重邏輯学与統計学的前景。而且，邏輯学与統計学应該主要地（虽然幷不排除其他方面）被看作是"信息理論"的基本工具。同时，围繞着对复杂的邏輯自动机和数学自动机所进行的設計、求值与編碼工作，已經积累起一批經驗，这将是信息理論的大多数的注意焦点。其中，最有典型意义的自动机（但不是唯一的），当然就是大型的电子計算机了。

应該順便指出，如果有人能够讲出关于这种自动机的"理論"，那我就非常滿意了。遺憾的是，直到目前为止，我們所据有的——我必須这样呼吁——，仍然只能說是还不完全清楚的、难于条理化的那样"一批經驗"。

最后，应当說，我的主要目的，实际上是要揭示出事情的頗为不同的一个方面。我希望，对神經系統所作的更深入的数学的研討(这里所說的“数学的”之涵义，在上文已經讲过)，将会影响我們对数学自身各个方面的理解。事实上，它将会改变我們对数学和邏輯学的固有看法。这个信念的理由何在，我将在后文加以解說。

第一部分　計算机

我从討論計算机系統的基础原理以及計算机的实践开始。

現有的計算机，可以分为两大类："模拟"計算机和"数字"計算机。这种分类，是根据計算机进行运算中表示数目的方法而决定的。

第一章　模拟方法

在模拟計算机中，每一个数，都用一个适当的物理量来表示。这个物理量的数值，以預定的量度单位来表示，等于問題中的数。这个物理量，可以是某一圆盘的旋轉角度，也可能是某一电流的强度，或者是某一电压（相对的电压）之大小等等。要使計算机能够进行計算，也就是說，能按照一个預先規定的計划对这些数进行运算，就必須使計算机的器官（或元件），能够对这些表示数值进行数学上的基本运算。

常用的基本运算

常用的基本运算，通常是理解为"算术四則"的运算，即：加($x+y$)、减($x-y$)、乘(xy)、除(x/y)。

很明显，两个电流的相加或相减，是沒有什么困难的（两个电流幷联起来，就是相加；相反的幷联方向，就是相减）。两个电流的相乘，就比較困难一点，但已有許多种电气器件能够进行相乘的运算；两个电流的相除，情况也是如此。（对于乘和除来說，所量度

的电流的单位当然应該是相关的，而对加和减来說，則不一定要这样。)

不常用的基本运算

一些模拟計算机的一个相当值得注意的特性，就是它进行不常用的运算。这是我在后面要进一步叙述的。这些模拟計算机，有时是按照算术四则以外的“基本”运算方法来建造的。經典式的“微分分析机”就是这一类，在那里，数值由某些圓盘的旋轉角度来表示。它的过程如下：它不用加 $(x+y)$ 与减 $(x-y)$ 来运算，而是用 $(x\pm y)/2$ 来运算，因为用一种現成的簡单元件——差动齿輪(象汽車上后軸所用的齿輪)，就可以进行这种运算。它也不用乘法 (xy)，而是采取另一种完全不同的方法：在微分分析机中，所有的数量都表現为时間的函数，而微分分析机用一种叫做“积分器”的元件，能够把两个数量 $x(t)$、$y(t)$，形成（“斯蒂杰斯”）积分 $z(t)\equiv\int^t x(t)dy(t)$①。

这个体系包括三个要点：

第一，上述三种基本运算，經过适当的組合，可以产生四种常用的算术基本运算中的三种，即加、减、乘。

第二，上述基本运算，和一定的“反饋”方法結合起来，就能产生第四种运算——除法。在这里，我不討論反饋的原理。这里只是說明，反饋除了表現为解出数学上蘊涵关系的一种工具外，它实际上还是一种特别巧妙的短路迭代与逐次逼近的綫路。

第三，微分分析机的一个眞正得到支持的根据是：它的基本运算——$(x\pm y)/2$和积分，对于許多类問題来說，比算术四则运算

① 这个积分式，是由数学家 Thomas Jean Stieltjes(1856—1896)提出的，故名斯蒂杰斯积分。——譯注

$(x+y, x-y, xy, x/y)$要更經济一些。更具体地說，任何計算机，要它解出一个复杂的数学問題时，必須先对这个問題作出"程序"。就是說，为解出这个問題而进行的复杂运算，必須用計算机的各个基本运算的組合来表示。这个程序，严格地說，往往只是这些組合的近似（近似到我們預定的任何程度）。对于某一类給定問題来說，如果一組基本运算和另一組基本运算相比，能够使用較簡单、較少的組合就能解出問題，那么，我們說这一組基本运算更有效。所以，专門对全微分方程的系統来說（微分分析机本来就是为解全微分方程而設計的），微分分析机的这几种基本运算，就比前面所讲的算术基本运算$(x+y, x-y, xy, x/y)$更有效一些。

下面，我要讲数字計算机。

第二章　数字方法

在一个十进制数字計算机中，每一个数都是用通常书写或印刷一样的方法来表示的，即用一序列的十进制数字来表示。而这每一个十进制的数字，又用一組"符号"系統来表示。

符号，它們的組合与体現

一个符号，可以用十个不同的形式表現，以滿足表示一組十进制数字的需要。要使一个符号，只以两种不同形式表示，則只在每一个十进制数字相对应于整个符号組时才能使用（一組 3 个的两值符号，可构成 8 个組合，这还不够表示 10 个十进制数字之用；一組 4 个的两值符号，則可以有 16 个組合，这就够用而有余了。所以，十进制数字，必須用至少 4 个一組的两值符号来表示。这就是

使用比較大的符号組的理由，見下述）。十値符号的一个例子就是在十根預定的导綫上各自出現一个电脉冲。两值符号是在一根預定的导綫上出現一个电脉冲，于是，脉冲的存在或不存在就传遞了信息（这就是符号的“値”）。另一种可能的两值符号，是具有正极性和負极性的电脉冲。当然，还有許多种同样有效的符号体系。

我們将进一步观察这些符号。上述十値符号，显然是一組10个的两値符号。我們已經說过，这組符号是高度过剩了。最小的組，包括4个两値符号的，也是可以用在同一体系中的。請考虑一个四根預定的导綫的系統，在它們之間，能够发生任何組合的、同时出現的电脉冲。这样，它可以有16种組合，我們可以把其中的任何10种組合規定为十进制10个数字的相应代表。

应当注意，这些符号通常都是电脉冲（或可能是电压或电流，持續到它們的标示生效为止），它們必須由电開裝置来控制。

数字計算机的类型及其基本元件

到目前为止的发展中，电磁机械的继电器、眞空管、晶体二极管、铁磁芯、晶体管已經被成功地应用了；有时是相互結合起来应用，比如在計算机的存儲器官（見后面的叙述）中用这一种元件，而在存儲器官之外（在“作用”器官中）則用另一种，这样，就使計算机产生了許多不同的种类①。

井行和串行綫路

現在，計算机中的一个数是用一序列的十値符号（或符号組）

① 在这节中，馮·諾意曼使用了“organ”（器官）这个詞，在計算机中，这本来可以譯为机构或部件。但是因为他往往把它和人的器官相比拟，因此还是直接譯作器官。——譯注

来表示的。这些符号，可以安排在机器的各个器官中同时出現，这就是**并行**。或者是把它們安排在机器的一个器官中，在連續的瞬間依次出現，这就是**串行**。比如，机器是为处理12位十进制数字而建造的，在小数点"左边"有6位，小数点"右边"也有6位，那么，12个这样的符号（或符号組）都应在机器的每一信息通道中准备好，这些通道是为通过数字而預备的。（这个方案，在各种机器中，可以采取各种不同的方法和程度，从而得到更大的灵活性。在几乎所有的計算机中，小数点的位置都是可以調整移动的。但是，我們在这里不打算进一步討論这个問題。）

常用的基本运算

数字計算机的运算，常常以算术四则为基础。关于这些人們已經熟知的过程，还应該讲以下的几点：

第一，关于加法：在模拟計算机中，加法的过程要通过物理过程作为媒介来进行（見上文所述）。和模拟計算机不同，数字計算机的加法运算，是受严格而具有邏輯特性的規則所控制的，比如，怎样形成数字的和，什么时候应該进位，如何重复和結合这些运算步驟等等。数字和的邏輯特性，在二进制系統中显得更加清楚（与十进制比較而言）。二进制的加法表（0+0=00，0+1=1+0=01，1+1=10），可表述如下：如果两个相加的数字不同，其和数字为1；如果两个相加数字相同，其和数字为0，而且，如两个相加数字都是1时，其进位数字为1，如两个相加数字都是0时，其进位数字为0。因为会出現进位数字，所以实际上需要3项的二进制加法表，即（0+0+0=00，0+0+1=0+1+0=1+0+0=01，0+1+1=1+0+1=1+1+0=10，1+1+1=11）。这个加法表，可以表述为：如果在相加的数字中（包括进位数），1的数目是

奇数(即1个或3个)，則和数字为1；如果1的数目不是奇数，則和数字为0。如果在相加数字中（包括进位数），1的数目是多数（2个或3个)，則进位数字是1；如果1的数目不是多数（而是1个)，則进位数字是0①。

第二，关于减法：减法的邏輯构造，和加法非常相似。减法可以（而且是通常地）簡化成为加法，运用一种簡单的手段——补数法，就可以做到这一点。

第三，关于乘法：乘法的基本邏輯特性，甚至比加法还要明显，其結构性质也比加法明显。在十进制中，乘数的每一个数字，与被乘数相乘，而得出乘积（这个相乘的过程，通常可用各种的相加方法，这对所有的十进制数字都是可以进行的)。然后，把上述各个乘积加在一起（还要有适当的移位)。在二进制中，乘法的邏輯特性更显明易見。二进制只可能有两个不同的数字——0与1，因此，只有乘数和被乘数都是1时，乘积才是1，否則乘积就是0。

以上的全部陈述，都是指正数的乘积而言。当乘数和被乘数有正、負符号时，則产生了4种可能的情况。这时，就需要有更多的邏輯規則来支配这4种情况。

第四，关于除法：除法的邏輯結构与乘法是可比較的，但除法还須加入各种重复的、試錯法的减法过程。在各种可能发生的变換情况中，为了得出商数，需要一些特別的邏輯規則，从而必須用一种串行的、重复的方法来处理这个問題。

总起来說，上述加、减、乘、除的运算，和模拟計算机中所运用的物理过程，有着根本的区别。它們都是交变作用的模式，組織在

---

① 这一段文字請讀者注意。例如，二进制加法1+1+0=10，我們过去一般习慣是說：1+1+0之和为10。在这段文字中，馮·諾意曼的表述为：1+1+0，其和数字(sum digit)为0，进位数字(carry digit)为1。——譯注

高度重复的序列中，并受严格的邏輯規則所支配。特别是对乘法和除法来說，这些規則具有十分复杂的邏輯特性。（这些运算的邏輯特性，由于我們长期地、几乎是本能地对它們熟习了，因而往往不易看出，可是，如果你强迫自己去充分表述这些运算，它們的复杂程度就会显現出来了。）

第三章 邏輯控制

除了进行基本运算的能力外，一个計算机必須能够按照一定的序列（或者不如說是按照邏輯模式）来进行运算，以便取得数学問題的解答，这和我們进行笔算的实际目的相同。在传統的模拟計算机中（最典型的是“微分分析机”），計算的“序列”是这样完成的：它必須具有足够的器官来完成計算所要求的各个基本运算，也就是說，必須具有足够的“差动齿輪”和“积分器”，以便完成这两种基本运算——$(x\pm y)/2$和$\int^{t}x(t)dy(t)$（参閱上文）。这些圓盘，即計算机的“輸入”与“輸出”的圓盘，必須互相連結起来（或者，更确切地說，它們的軸必須連結起来），（在早期的模型中，用嵌齿齿輪連接，后来則用电从动装置——自动同步机），以便模拟所需的計算。应該指出，連接的方式是可以按照需要而組装起来的，即随需要解算的問題而定，使用者的意图可以貫彻在机器設計里面。这种“連接”，在早期的机器中用机械的方法（如前述的嵌齿齿輪），后来則用插接的方法（如前述的电連接）。但不管如何，在解題的整个过程中，任何这些形式的連接，都是一种固定的装置。

插入式控制

在一些最新的模拟机中，采用了进一步的办法。它們使用电的“插件的”連接。这些插入連接实际上被电磁机械继电器所控制；电磁铁使继电器通路或断路，因而产生电的激励，使連接发生变換。这些电激励可以由穿孔紙带所控制；在計算中，在适当瞬間发出的电信号，可以使紙带移动和停止（再移动，再停止……等等）。

邏輯带的控制

刚才我們所說的控制，就是指計算机中一定的数字器官达到某一預定条件的情况，比如，某一个数开始变为負号，或者是某一个数被另一个数所超过等等。应当注意，如果数是用旋轉圓盘来表示，它是正号或負号，就从圓盘通过零点向左还是向右轉动来判定；一个数被另一数超过，則可以从它們的差成为負数而察觉出来等等。这样，“邏輯”带的控制（或者更恰当地說，一种“与邏輯带控制相結合的計算状态”），是在基本的“固定連結”控制的基础之上的。

数字計算机就是从这些不同的控制系統开始的。但是，在討論这个問題之前，我还要先对数字計算机作出一般的評述，并評述它和模拟計算机的关系。

每一基本运算只需要一个器官的原理

在开始，必須强調，数字計算机中的每一基本运算，只需要一个器官。这和大多数的模拟机相反。大多数模拟計算机是每一基本运算需要有足够多的器官，需要多少要看待解算的問題的情况而定（前面已經讲过）。但是，应該指出，这只是一个历史的事实而

不是模拟机的內在要求。模拟計算机（上面所讲过的电連結方式的模拟机），在原則上，也是能够做到每一基本运算只需要一个器官的，而且它也能够采用下文所讲到的任何数字型的邏輯控制。（讀者自己可以不很困难地证明，上面已經讲到的“最新”型的模拟机的控制，已經标志着向运算方式[1]的轉变。）

应該进一步說明，某些数字計算机也会或多或少地脫离了“每一基本运算只需要一个器官”的原則，但是，再作一些比較簡单的解释，这些偏离也还是可以被納入这个正統的方案中的。（在某些情况下，这只不过是用适当的相互通訊的方法来处理双重机〔或三重机〕的問題而已。）在这里，我不准备进一步討論这个問題了。

由此引起的特殊記忆器官的需要

“每一基本运算只需要一个器官”的原則，需要有較大数量的器官才能被动地存儲許多数，这些数是計算过程的中間結果或部分結果。就是說，每一个这种器官，都必須能“存儲”一个数（在去掉这器官中前已存儲的一个数之后）。它从另外一个当时与它有連結的其他器官，把这个数接受过来；而且当它受到“詢問”时，它还能够把这个数“复述”出来，送給另外一个此时与它連結的器官。上述的这种器官，叫做“存儲寄存器”。这些器官的全体，叫做“記忆”。在一个記忆中存儲寄存器的数量，就是这个記忆的“容量”。

我們現在能够进而討論数字計算机的主要控制方式了。这个討論，最好从描述两个基本类型入手，并且接着叙述把这些类型結合起来的若干明显的原則。

---

[1] 运算方式，原文是modus operandi（拉丁文），原意为运算状态或运算方法，因用此譯名。——譯注

用“控制序列”点的控制

第一个已被广泛采用的基本控制方法，可以叙述如下（这里已經作了若干簡化与理想化）：

計算机包括一定数量的邏輯控制器官，叫做“控制序列点”，它具有下面所讲的功能（这些控制序列点的数量相当可观，在某些較新型的計算机中，可以达到几百个）。

在采用这一种系統时，最簡单的方式是：每一个控制序列点連接到一个基本运算器官上，这个运算器官受它所驅动。它还連結到若干存儲寄存器上，这些寄存器供給运算的数字輸入；同时，又接到另一寄存器上，这个寄存器接受它的輸出。經过一定时間的延滞（延滞时間必須足以完成运算），或者在接收到一个“运算已完成”的信号之后，这个控制序列点就驅动下一个控制序列点，即它的“承接者”。（如果运算时間是变量，它的最大值为不定值或者是不能允許地漫长的話，那么，这个过程当然就需要有与这个基本运算器官的另一个增添連結。）按照这样的連接，以相同的办法一直作用下去。一直到不需要再操作为止，这就构成了一个无条件的、不重复的計算方式。

如果某些控制序列点連接到两个“承接者”上面（这叫做“分支点”），那么，就可能产生两种状态——A 和 B，从而得到更錯綜复杂的方式。A 状态使过程沿第一个承接者的途徑继續下去，B 状态则使过程沿第二个承接者的途徑继續下去。这个控制序列点，在正常时，是处在 A 状态的，但由于它接到两个存儲寄存器上面，其中的某些情况会使过程从 A 变为 B，或者反过来，从 B 变为 A。比如：如果在第一个存儲寄存器中出現負号，那就使过程从 A 轉变到 B；如果在第二个存儲寄存器中出現負号，那就使过程从 B 轉

变到 A。(注意：存儲寄存器除了存儲数字之外，它还存儲数字的正号或負号，因为这是任一两值符号的前置符号。)現在，就出現了各种可能性：这两个承接者可表示計算的两个析取分支。走哪个分支，取决于适当地預定的数字判据。(当"从 B 到 A"是用来恢复进行一項新演算的原始状态时，则控制"从 A 到 B"。)这两个待选择的分支也可能在后来重新統一起来，汇合到与下一个共同的承接者的連結上面。但是，还有一个可能性：两个分支之一，比如是被 A 所控制的那一个，实际上又引回到起初我們所說的那个控制序列点上(就是在这点上分为两分支的)，在这种情况下，我們就遇到一个重复的过程。它一直迭代到发生一定的数字判据为止(这个判据就是从 A 轉变到 B 的指令)。当然，这是一种基本的迭代过程。所有这些方法，都是可以互相結合和重叠的。

在这种情况下，正如已經讲过的模拟机的插入式控制一样，电連接的整体，是按照問題的結构而定的，即按照要解算的問題的算式而定，也就是依照使用者的目的而定。因此，这也是一种插入式的控制。在这种方式中，插接的模式可随解算問題的不同而变化，但是，在解算一个問題的全部过程中，插入方式是固定的(至少在最簡单的装置中是如此)。

这个方法，可以从許多途徑使它更精細起来。每一个控制序列点可以和好几个器官連接，可以激励起超过一次以上的运算。正如在上面讲过的模拟机的例子一样，这种插入連接实际上可以由电磁机械继电器去控制，而继电器又可通过紙带来控制，在計算中所产生的电訊号，使紙带移动。我在这里，就不进一步叙述这种方式所可能产生的各个变化了。

記忆存儲控制

第二种基本的控制方法，是記忆存儲控制，它的进展很快，已經将要取代第一种方法了。这个方法可以叙述如下（这也还是作了若干簡化了的）。

这种控制方式，在形式上和插入控制方法有若干相似之处。但是，控制序列点現在由“指令”所代替了。就体現在这种方式中的大多数情况来說，一个“指令”，在物理意义上是和一个数相同的（指計算机所处理的数，參閱上文）。在一个十进制計算机中，它就是一序列十进制数字（在我們第二章中所举的例子里，它就是12个带有或不带有正、負号的十进制数字。有时，在标准的数的位置中，包含着一个以上的指令，但这种情况这里不必討論）。

一个指令，必須指出要执行的是哪一种基本运算，这个运算的輸入将从哪一个記忆寄存器中取得，运算后的輸出要送到哪一个記忆寄存器去。要注意，我們已預先假定，所有的記忆寄存器的編号是成系列的，每一記忆寄存器的編号数目，叫做它的“地址”。同时，給各个基本运算編上号碼，也是很便当的。这样，一个指令，只要簡单地包括运算的編号和記忆寄存器的地址就成了，它表現为一列十进制数字（而且它的順序是固定的）。

这种方式，还有一些变种。但是，在目前的叙述中，它們并不特别重要。比如，一个指令，用上面讲过的方法，也可以控制一个以上的运算；也可以指示它所包含的地址，在进入运算过程之前，以某一特定方法加以修改。（通常运用的、实际上也是最重要的修改地址的方法，是对各个地址增加一个特定的記忆寄存器。）或者，也可以用另外一些方法。如用特别的指令来控制这种修改，或者使一个指令只受上述各个操作中的某一組成部分的影响。

指令的更重要的方面是：如上面讲过的控制序列点的例子一样，一个指令必須决定它的承接者——是否有分支（参閱上文）。我曾指出过，一个指令通常在物理意义上是和一个数相同的。因此，存儲指令的自然方法（在所控制的解題过程中），是把它存儲在記忆寄存器里。换句話說，每一指令都存儲在記忆中，即在一个規定的記忆寄存器中，也就是在一个确定的地址中。这样，就給我們对指令承接者的处理，提出了許多条特定的途徑。因此，我們可以規定，如果一个指令的地址在 X，其承接者的指令地址則在 $X+1$（除非指明是逆接的情况）。这里說的“逆接”，是一种“轉移”，它是一种指明承接者在預定地址 Y 的特殊指令。或者，一个指令中也可以包括“轉移”的子句，以規定它的承接者的地址。至于“分支”，可以很方便地被一个“有条件的轉移”指令所掌握。这种有条件的轉移指令，規定承接者的地址是 X 或 Y。是 X，还是 Y？取决于一定的数字条件是否出現——也就是說，一个給定地址 Z 的数字，是不是負数。这样的一种指令，必須包含着一个編号，作为这种特殊形式指令的特征（这个特別的数字符号，它在指令中所占的位置，以及它的作用，和上面讲过的标志基本运算的符号是一样的），而且地址 X、Y、Z 都表現为一序列的十进制数字（見上文所述）。

应該注意本节所讲的控制方式和上文讲过的插入式控制的重要区別：插入控制序列点是眞实的、物质的对象，它們的插件連結表达了要計算的問題。本节所讲的这种控制的指令，則是一种概念上的东西，它儲存在記忆中；記忆中的这一特定部分，表达了要計算的問題。由于这样，这种控制方式被称为“記忆存儲控制”。

記忆存儲控制的运算方式

在上述情况下，由于进行全部控制的各项指令都在記忆中，因

而能够取得比以往任何控制方式更高的灵活性。計算机在指令的控制下，能够从記忆中取出数（或指令），对它进行加工（好象数的运算一般），然后把它归还到記忆中去（回到它原来的或其他的位置上）。这也就是說，这种方式能够改变記忆的內容——这就是正常的**运算方式**。特别是它能够改变指令（因为指令存在記忆里），改变控制它自己的动作的有关指令，所以，建立所有各种复杂的指令系統都是可能的。在系統中，可以相继地改变指令，整个計算过程在这样控制之下进行。因此，比仅仅是重复过程复杂得多的系統，都是可能办得到的。虽然这种方法十分勉强和十分复杂，它仍然被广泛采用了，而且在現代的机械計算——或者更恰当地說，在計算程序——的实践中，具有非常重要的作用。

当然，指令系統——它意味着要解出的問題和使用者的意图——是通过把指令"装放"进記忆里去的办法来同計算机互通信息。这通常是由預先准备好的紙带、磁带或其他相类似的媒介来完成的。

控制的混合方式

上面讲过的两种控制——插入式和記忆存儲式，可以形成各种不同的組合。关于这方面，还可以說几句。

考虑一台插入控制的計算机，如果它具有和記忆存儲控制計算机所具有的那种記忆部分，它就可能用一序列数字（以适当的长度）来描述它的插接的全部状态。这个序列存儲在記忆中，大体上占有几个数碼的位置，即几个順序的記忆存儲器。換句話說，它可以从若干个順序的地址中找到这个序列，其中头一个地址，可以作为这一串地址的縮写，代表整个序列。記忆部分可以負載几个这样的序列，表示几个不同的插接方案。

此外，計算机也可能是完全的記忆存儲的控制方式。但除这种系統的本来有的指令外(参見上述)，还可以有下列形式的指示。第一，一种使插接件复位的指令，根据在規定的記忆地址中存儲的数字序列，使插接件复位。第二，一种指令的系統，能够改变各插接件中的某一定的单项。(請注意，上面这两种指令，都要求插入件必須受电控制装置——如继电器，或眞空管，或铁磁芯等的作用。)第三，一种指令，能够使控制方式从記忆存儲式轉为插入式。

当然，插入式方案还必須能够指定記忆存儲控制(它可預設为一規定的地址)作为一个控制序列点的承接者(如果在分支的情况下，則作为承接者之一)。

第四章 混合数字方法

上面的这些評述，已經足以描繪出在各个控制方式及其相互組合中的灵活性。

应該引起我們注意的更进一步的計算机的"混合"类型，是模拟原則和数字原則同时存在的計算机类型。更准确地說，在这种計算机的設計方案中，一部分是模拟的，一部分是数字的，两者互通信息(数字的材料)，并接受共同的控制。或者是，这两部分各有自己的控制，这两种控制必須互通信息(邏輯的材料)。当然，这种装置要求有能从已給定的数字轉換成为模拟量的器官，也要求有从模拟量轉換成为数字的器官。前者意味着从数字表达中建立起一个連續的量，后者意味着測量一个連續的量并将其結果以数字形式表現出来。完成这两个任务的各种元件，包括快速的电元件，是我們所熟知的。

数的混合表現，以及在此基础上建造的計算机

另一类重要的"混合"型計算机，是这样的一些計算机，它在計算程序中的每一个步驟(但是，不是它的邏輯程序)，都包含了模拟的原則和数字的原則。最簡单的情况是：每一个数，部分地以模拟方法表示，部分地以数字方法表示。我在下面将描述这样的一个方案，它常常表現于元件和計算机的建造和設計以及一定类型的通訊中，虽然目前还沒有一种大型机器是用这种方案来建造的。

这种系統，我把它叫做"脉冲密度"系統，每一个数用一序列的順次的电脉冲来表示(在一条綫路上)，因此序列的长度是各不相同的，但脉冲序列的平均密度(在时間上)就是要表达的数。当然，必須規定两个时間間隔 t_1 和 t_2 (t_2 应比 t_1 大得相当多)，上述的平均数必須在 t_1 与 t_2 时間之內。問題中的数，如以这种密度表示时，必須先規定它的单位。或者，也可以让这个密度不等于这个数的本身，而等于它的适当的(固定的)单調函数(monotone function)——比如，它的对数(采用这一办法的目的，是当这个数很小时，可以得到較好的表达；但当这个数很大时，这种表达方法就較差了，而且会带来所有連續的蔭蔽〔shadings〕)。

我們可以設計出能把算术四則应用于这些数的器官。于是，脉冲密度表示数的本身，而两个数的相加，只要把这两个序列的脉冲加起来就成。其他的算术运算比較需要一点窍門，但是，适用的、多少也算是巧妙的方法也还是存在的。我在这里，将不討論如何表示負数的問題，这个問題用适当的方法还是容易解决的。

为了获得适当的准确度，每一序列在每一时間間隔 t_1 內，必須包括許多个脉冲。如果在計算过程中，需要改变一个数，則它的序列的密度須随之改变，这就使这一过程比上述的时間間隔 t_2 慢。

在这种計算机中，数的条件之讀出(为了邏輯控制的目的)，可能带来相当的麻煩。但是，仍然有許多种装置可以把这样的数(一个时間間隔内的脉冲密度）轉换为一个模拟的量。(比如，每个脉冲，可以向一个緩漏电容器供給一次标准充电〔通过一給定电阻〕，并将它控制在一个合理的稳定电压水平和电漏电流值上。这两者都是有用的模拟量。）上面已經讲过，这些模拟量能够用来进行邏輯控制。

在叙述了計算机的功能和控制的一般原則之后，我将对它們的实际使用以及支配它的原理作若干述評。

第五章　准确度

让我們首先比較模拟計算机和数字計算机的运用。

除了其他各方面的考虑外，模拟計算机的主要局限性是它的准确度問題。电模拟机的准确度难得有超过 $1:10^3$ 的，甚至机械的模拟机（象微分分析机）在最好的情况下也只能达到 $1:10^4$ 至 $1:10^5$。而另一方面，数字計算机却能达到任何我們所需要的准确度。比如，我們已經讲过，12 位十进制計算机，就标志着 $1:10^{12}$ 的准确度(我們在后面还要进一步討論，这已經标志着現代計算机的相当典型的准确度水平)。还应該注意，数字計算机要提高准确度的話，比模拟机容易。对微分分析机来說，从 $1:10^3$提高到 $1:10^4$的准确度，还比較簡单，从 $1:10^4$ 要提高到 $1:10^5$，就已經是現有技术所可能达到的最佳結果；用目前已有的方法，再要使准确度从 $1:10^5$ 提高到 $1:10^6$，則是不可能的了。而另一方面，在数字計算机中，使

准确度从 $1:10^{12}$提高到 $1:10^{13}$,仅仅是在12位数字上加上1位,这通常只意味着在設备上相对地增加$\frac{1}{12}=8.3\%$(而且还不是計算机装置的每一部分都要如此增加),同时在速度上只損失同一比例(也不是每一处的速度都要損失),这两者的变化,都是不严重的。拿脉冲密度系統和模拟系統来比較,脉冲密度系統的准确度更差。因为在脉冲密度系統中,$1:10^2$ 的准确度要求在时間間隔 t_1 中,有 10^2 个脉冲,就是說,单单就这个因素来說,机器的速度就要减少100倍。速度按这样的数量級减少,是不妙的,如果要作更大的减少,一般就认为是不能允許的了。

需要高度的准确度(数字的)之理由

可是,現在会产生另外一个問題,为什么这样高度的准确度(例如在数字計算机中为 $1:10^{12}$),是必要的呢?为什么典型的模拟机($1:10^4$)或甚至脉冲密度系統($1:10^2$)的准确度是不够的呢?我們知道,在大多数应用数学問題和工程技术問題中,許多数据的准确度不会优于 $1:10^3$ 或 $1:10^4$,甚至有时还达不到 $1:10^2$ 的水平。所以,它們的答案也用不着达到更高的准确度,因为这样提高准确度是沒有意义的。在化学、生物学或經济学的問題中,或在其他实际事务中,准确度的水平甚至还要低一些。可是,在現代高速計算方法的一貫經驗中,都說明了:对于大部分的重要問題,甚至 $1:10^5$ 的水平还是不够用的。具有象 $1:10^{10}$ 和 $1:10^{12}$ 准确度水平的数字計算机,在实践中已被证明很有必要。这个奇怪的現象之理由,是很有趣和很有意义的。它和我們現有的数学的与数值过程的固有結构有关。

标志这些过程的特性的事实是:当这过程分析为它的各个組成元素时,过程就变得非常长了。对所有适于运用快速电子計算机

的問題来說(即至少是具有中等复杂程度的問題),都是如此。根本的理由,是因为我們現在的計算过程,要求把所有的数学函数分析为基本运算的組合,即分析为算术四則或其他大致相当的运算程序。实际上,絕大多数的函数只能用这种方法求得近似値,而这种方法意味着在絕大多数情况下,需要很长的、可能是迭代的一序列基本运算(見前文所述)。換句話說,必要的运算之"算术深度",一般是很大的。还应指出,它的"邏輯深度"則是更大的;同时,由于一个相当重要的原因——比如:算术四則必須分解为基本的邏輯步驟,因而每一次运算本身都是一条很长的邏輯鏈子。但是,我們这里只需要談談算术深度的問題。

如果有很大量的算术运算,則每一次运算所出現的誤差是叠加的。由于这种誤差主要地(虽然还不是完全地)是随机的,如果有N次运算,誤差将不是增加N倍,而是大約增加$\sqrt{N}$倍。仅从这一点道理来說,要得到一个$1:10^3$准确度的綜合結果,还不需要每一步运算都要达到$1:10^{12}$的准确度。因为只有当N为10^{18}时,$\frac{1}{10^{12}}\sqrt{N}\cong\frac{1}{10^3}$。而在最快速的現代計算机中,$N$也很难得大于$10^{10}$。(一个計算机,每一步算术运算只需要20微秒,充其量来說,每个問題大約要解48小时,即使这样,N也只是10^{10}左右!)。但是,我們还得考虑其他的情况。在計算过程中所进行的运算,会把前一步运算所发生的誤差放大了。这将会极快地超过于刚才讲过的每一步准确度与要求綜合結果的准确度之間的数字差距。上面讲过,$1:10^3$被$1:10^{12}$除,得10^9;但是,只要有425次順次的运算,如果每一步运算只发生5%的誤差,依次递增的結果,就会达到10^9的誤差了。我在这里,不准备对此問題作具体的、实际的估計,特別是因为計算技术中已有不少办法减低这个效应。但不管怎样,从大量經驗所得到的結論来看,只要我們遇到的是相当复杂的問

题，上述的高度准确度水平是完全必要的。

在我們离开計算机的直接問題之前，我还要讲一下关于計算机的速度、大小以及諸如此类的事情。

第六章 現代模拟計算机的特征

在現有的最大型的模拟計算机中，基本运算器官的数目，大体上是一两百个左右。当然，这些器官的性质，取决于所采用的模拟过程。在不久以前，这些器官已趋向于用电的、至少也是电气-机械的結构了（机械級是用来提高精确度的，見上述）。如果具备了周密細致的邏輯控制，这可以給这个系統加上一定的典型的数字执行器官（象所有这种类型的控制系統一样），这些器官是电磁机械继电器或眞空管等（在这里，对眞空管沒有用到最大的速度）。这些元件的数目，可以多到几千个。这样的一台模拟計算机，其投資甚至可能达到一百万美元的数量級。

第七章 現代数字計算机的特征

大型数字計算机的結构，更加复杂。它由“作用”器官和具有“記忆”功能的器官組成。对于記忆器官，我将把“輸入”和“輸出”的器官都包括在内，虽然这在实践中还不是普遍应用了的。

作用器官是这样的。第一，这些器官进行基本的邏輯操作：讀出叠合，把各个脉冲結合起来，幷可能也要讀出反叠合（此外，就不

需要具有再多的功能了。虽然有时也还有更复杂的邏輯运算器官)。第二，这些器官可以再产生脉冲：恢复逐渐消耗的能量；或只把机器的这部分的脉冲，简单地提高到另一部分的較高的能量水平上面来(这两种功能都叫做放大)。有些器官，还可以恢复脉冲所需要的波形和同步(使之在一定的允差和标准之內)。請注意，我刚才所說的第一种邏輯运算，正是算术运算的基本要素(参閱上文)。

作用元件，速度的問題

所有上述的功能，从历史順序上說，是由下列元件来完成的：电-机械继电器，眞空管，晶体二极管，铁磁芯，晶体管，或各种包括上述元件的小型綫路。继电器大約可以达到每个基本邏輯动作需要10^{-2}秒的速度。眞空管則可以把速度提高到10^{-5}到10^{-6}秒的数量級(在最佳的情况下，可达到10^{-6}秒的一半或四分之一)。铁磁芯和晶体管等，即被归类为固态装置的元件，大約可以达到10^{-6}秒的水平(有时可达10^{-6}秒的几分之一)；而且差不多可扩展到每基本邏輯动作只需10^{-7}秒的速度領域內，甚至还可能更快一些。其他还有一些装置(我們这里不拟討論了)，可以使速度更进一步提高。我預期，在下一个十年，我們有可能达到10^{-8}至10^{-9}秒的速度水平。

所需的作用元件的数目

在大型現代計算机中，作用器官的数目，随計算机类型之不同而各异，大約从3,000个到30,000个左右。在其中，基本的算术运算通常是由一种組件来完成的(更准确地說，是由一組或多或少地合幷起来的組件来完成的)。它叫做“算术器官”。在一个大型的

現代計算机中，这个器官，大約包括从 300 个到 2,000 个的作用元件，随型式不同而定。

我們在下面还要說到，若干作用器官的一定組合，可用来完成某些記忆的功能。一般地說，这需要 200 个到 2,000 个作用器官。

最后，适当的“記忆”集合，需要有輔助的子組件，它由作用器官組成，用以为記忆集合服务和管理它們。对于那些不包括作用器官的記忆集合来說(詳見后文。用該处的术語来說，这是記忆分級的第二級水平)，这个功能可能需要 300 至 2,000 个作用器官。对于整个記忆的各个部分来說，相应需要的輔助的作用器官，可能相当于整个計算机作用器官的 50%左右。

記忆器官的存取时間和記忆容量

記忆器官属于几种不同的类别。据以分类的特征是“存取时間”。存取时間可定义如下：第一，存取时間是存儲已在計算机其他部分出現的数的时間。(通常是在作用器官的寄存器中出現的，見下文。)或者是移出記忆器官中已經存入的数的时間。第二，当被“詢問”时，記忆器官对机器的其他部分，“重述”已經存入的数所需要的时間。这里所說的机器的其他部分，是指接受这个数的元件(通常是指作用器官的寄存器)。为方便起見，可以把这两个时間分别說明(叫做“存入”时間或“取出”时間)；或者就用一个数值，即用这两个时間中較大的一个来代表，或者用它們的平均数。再者，存取时間可能变化，也可能不变化，如果存取时間并不取决于記忆地址，它就叫做“随机存取”。即使存取时間是可变的，我們也只采用它的一个数值，通常是用它的最大值，或用它的平均值。(当然，存取时間的平均值，将取决于待解算問題的統計性质。)不管怎样，为了簡化起見，我在这里将只使用一个单一的存取时間值。

以作用器官构成的記忆寄存器

記忆寄存器可以用作用器官构成。它們具有最短的存取时間，但却是最費錢的。这样的一个寄存器，連同它的存取設备，对每一个二进制数字（或每一个正号、負号），就需要至少是4个眞空管的綫路（如用固态元件时，可以少一点儿）。而对每个十进制数字来說，眞空管的数目还要大4倍以上。我們上面讲过的12位十进制数字（和正、負符号）的系統，則一般需要196个眞空管的寄存器。但另一方面，这样的寄存器具有一个或两个基本反应的存取时間，这些时間和其他各种可能的时間比較起来，还是非常快的。同时，有几个这样的寄存器可以为整个装置带来一定的經济效益；对于其他形式的記忆器官来說，必須用这种作用器官构成的寄存器，作为"存入"和"取出"的器官；而且，作为算术器官的一部分，也需要有一个或两个（某些設計中甚至还需要三个）的这种寄存器。总而言之，如果这种寄存器的数目适当的話，它会比我們初看起来的估計要經济一些，同时，在这个范围內，計算机的其他器官也很需要这样的記忆寄存器作为其附属部分。可是，把这种作用器官构成的記忆寄存器，用来配备大容量的記忆器官，看来是不适宜的。而这样大容量的記忆器官是几乎所有的大型計算机都需要的。（請注意，这个观察推論只是适用于現代的計算机，即在电子管时代及其以后的計算机。在此以前的继电器計算机中，继电器就是作用器官，而用继电器构成的記忆寄存器則是記忆的主要形式。因此，請注意，以下的討論，也請讀者了解为仅是适用于現代計算机的。）

記忆器官的譜系原理

如上所述，对于那些龐大的記忆容量，必須运用其他型式的

記忆器官。因此，就引入了一个記忆的“譜系”原理（Hierarchic principle）。这个原理的意义可叙述如下：

一个計算机，为了完成它的应有功能（解算要它解答的問題），它需要一定数目的記忆容量，比如說，在一定的存取时間t时，需要記忆N个字。要在存取时間t內提供这N个字，可能存在着技术上的困难，或者在經济上非常昂貴（技术上的困难，也往往是通过昂貴的费用表示出来的）。但是，在这个存取时間t內，可能并不需要提供所有的这N个字，而只需要提供一个相当减少了的数目——N'个字。而且，当在存取时間t內供应了N'个字之后，整个容量的N个字，只是在一个更长的存取时間t''时才需要。这样分析下去，我們可能进一步遇到这样的情况：在一个长于t而短于t''的存取时間內，提供一定的中間容量——即少于N字而多于N'字，可能是最經济的。最普通的方案，是規定一序列的記忆容量N_1、N_2、…N_{k-1}、N_k以及一序列的存取时間t_1、t_2、…t_{k-1}、t_k。这样的两个譜系的序列，使全部記忆容量划分得更加精确；而存取时間的規定則比較放松了一点。这两个譜系的序列是：$N_1<N_2<\cdots<N_{k-1}<N_k$，和$t_1<t_2<\cdots<t_{k-1}<t_k$；而且在存取时間$t_i$时，需要相应的容量$N_i$个字，此处$i=1, 2, \cdots k-1, k$。（为了使这两个序列和我們刚才所說的一致，讀者应該了解，$N_1=N', t_1=t, N_k=N, t_k=t''$。）在这个方案中，每一个$i$的值，代表記忆譜系的一个水平；記忆的譜系，共有$k$个水平。

記忆元件，存取問題

在一个現代的大型高速計算机中，記忆譜系的水平总数，将至少是三級，或可能是四級、五級水平。

第一級水平，常常就是指我們在上面讲过的寄存器的水平。这

一級的 N_1，在差不多所有的計算机設計中，都至少是 3 个字，或者更多一些。有时甚至曾提出要达到 20 个字。存取时間 t_1，則是計算机的基本开关时間（或可能是这个时間的两倍）。

第二級的水平，常常是靠专門的記忆器官的帮助来达到的。这些专門的記忆器官，和計算机其他部分用的开关器官不同，和用于上述第一級水平的开关器官不同。这个水平所用的記忆器官，通常須有記忆容量 N_2，約从几千个字到几万个字（几万个字的容量，在目前还是在設計阶段中）。其存取时間 t_2，一般比上述第一級水平的存取时間 t_1 长 5 倍至 10 倍。

更高級的各級水平，其記忆容量 N_i 的增加，一般是每級增加10倍左右。存取时間 t_i 的增长，比这还要快一些。但是，同时还須考虑限制和規定存取时間的若干規則（参見后文）。現在就进一步詳細討論这个問題，似乎是过于具体了。

最快速的記忆元件，即专門的記忆器官（不是作用器官，見前述），是某些静电装置和磁心陣列。在目前来看，磁心陣列的使用，肯定居于优势，虽則其他的技术方法（静电、铁-电体等）也可能再入或进入这个领域。在記忆譜系的較高的水平上面，目前使用磁鼓和磁带的最多，磁盘也曾被建議采用并加以探索。

存取时間的概念之复杂性

上面所讲的三种装置，都受特殊的存取規則和限度所制約。磁鼓的各个部分，是順序地和循环地出現的，以供存取。磁带的記忆容量实际上是无限制的，其各个部分的出現則按照一个固定的直綫順序，需要时，它还可以停下来或反向移动。所有这些方案，都可以和各种不同的安排結合起来，以便使計算机的功能和固定的記忆序列之間得到特定的同步。

任何記忆譜系的最后一級，都必須和外間世界发生关系。所謂外間世界，是計算机所关連的外界，也就是計算机能够直接互通訊息的外界，換句話說，就是計算机的輸入和輸出器官。計算机的輸入和輸出器官，一般都是用穿孔紙带或卡片；在輸出端，当然也有用印刷紙片的。有时，磁带是計算机最后的輸入-輸出系統，而把它翻譯成为人們能够直接使用的媒介（穿孔卡片或印刷紙片）的工作，則是在机器以外进行的。

下面是若干存取时間的絕对值：現有的铁磁芯記忆装置，是5～15微秒。静电記忆装置，是8～20微秒。磁鼓記忆装置，每分钟2,500～20,000轉，即每轉24～3毫秒，在这24～3毫秒內，可供应1～2,000个字。磁带的速度，已达每秒70,000綫，即每14微秒1綫，一个字約包含5～15綫。

直接地址的原理

所有現有的計算机及其記忆装置，都使用“直接地址”。就是說，記忆中的每一个字，都有一个自己的数碼地址，作为这个字以及它在記忆中的位置的唯一标志。（上面所說的記忆，是指記忆譜系的各个水平的总体而言。）当記忆的字在讀出或写出时，即須明确規定它的数碼地址。有时，并不是記忆的所有部分都是在同一时間里能够存取的。（見上述；在多級記忆中，可能不是所有的記忆都在同一时間內被接受的，而是按一定的存取优先規定先后被接受。）在这种情况下，对記忆的存取，取决于在需要存取时計算机的一般状况。可是，对于地址和地址的指定位置，則永远不应該有任何含糊之处。

第二部分　人脑

我們在上面的討論,已經提供了比較的基础,而比較則是本书的目的。我曾相当詳細地叙述了現代計算机的本质，以及組成計算机的寬广的可供抉择的种种原理。現在，我們有可能轉入另一項比較，即与人类神經系統的比較。我将討論这两类“自动机”之間的相似与不相似之点。找出它們相类似的要素，将引向我們所熟悉的領域。同时,还有若干不相类似的要素。这些相异之处,不仅存在于大小尺寸和速度等比較明显的方面,而且存在于更深入、更根本的方面,包含:功能和控制的原理,总体的組織原理等等。我的主要目的，是探討后一方面。但是，为了对这些作出恰当的評价,把相类似的地方和那些更表面的不同之处(如大小、速度等),并列和結合起来討論，也是需要的。因此，下面的討論，也同时对这些內容給以相当的强調。

第八章　神經元功能簡述

对神經系統作最直接的观察，会觉得它的功能**显而易見**地是数字型的。我們有必要比較充分地討論这个事实，以及討論作出这一判断所依据的构造和功能。

神經系統的基本元件,是**神經細胞**,或称**神經元**。神經元的正常功能,是发出和传播**神經脉冲**。这个脉冲,是一种相当复杂的过程,有着各种不同的表現——电的、化学的和机械的。但是，看来

它却是一个相当单一的規定的过程，就是說，它在任何条件下都是一致的；对于变化范围相当广闊的刺激来說，它表現出一种在本质上是可以再現的、单一的反应。

让我較詳細地討論和这本书的內容有关的神經脉冲的各个方面。

第九章　神經脉冲的本质

神經細胞包含一个**細胞体**，从它那儿，还直接或間接地引出一个或多个分支。每一个分支，叫做細胞的**軸突**（axon）。神經脉冲就是沿着每一根軸突所传导的一种連續的变化。传导一般是以固定的速度进行的，这个速度也可能是神經細胞的一个功能。正如前面所說，上述变化的情况，可以从多方面来看。它的特征之一是必然存在着一种电扰动；事实上，人們往往也把这个变化描述为一种电扰动。这个电的扰动，通常具有大約50毫伏的电位和約1毫秒的时間。与电扰动同时，沿着軸突还发生着化学变化。即在脉冲电位和經过的軸突面积内，細胞內液（intracellular fluid）的离子构成起了变化，因而，軸突壁（**細胞膜**）的电化学性质——如电导率、磁导率等，也起了变化。在軸突的末端，化学性质的变化就更加明显；在那里，当脉冲到达时，会出現一种特殊的具有标志性的物质。最后，可能还有着机械变化。細胞膜各种离子导磁率的变化，很可能只能从它的分子的重新取向排列才能发生，这就是一种机械变化，即包括这些构成成分的相对位置的变化。

应該說明，所有这些变化都是可逆的。就是說，当脉冲过去之后，所有軸突周围的各种条件、所有它的組成部分，都可以恢复到

原来的状态。

因为所有这些效应，都在分子的水平上进行（細胞膜的厚度，大約只有几个十分之一微米左右，即約 10^{-5} 厘米。这就是細胞膜所包括的大的有机分子的尺寸）。因此，上述电的、化学的和机械的效应，其間的区分是不很清楚的。在分子水平上，在这些变化之間，幷无截然的区别：每一次化学变化，都是由决定分子相对位置变化的分子內力的变化而引起的，因此，它又是机械的誘发过程。而且，每一个这样的分子內力的机械变化，都影响到分子的电性质，因而引起电性质的变化和相对电位水平的变化。总之，在通常的（宏观）尺度上，电的、化学的、机械的过程，是能够明确区分的，不属于这一类，就属于那一类；但是，在接近分子水平的神經細胞膜中，所有这些方面都合幷起来了。因此，很自然地，神經脉冲就成为这样一种現象，我們可以从这几个方面中的任何一个方面去考察它。

刺激的过程

如前所述，已經充分显現出来的神經脉冲是可以比較的，而不管它是怎样被誘发出来的。由于它的特性幷不是非常明确的（它可以被看作是电的过程，也可以看作是化学的过程等），因此，它的誘发原因，同样也可以既归之于为电的原因，又归之于化学的原因。而且，在神經系統內，大多数的神經脉冲，又是由一个或多个其他神經脉冲所引起的。在这些情况下，这一誘发的过程（神經脉冲的**刺激**），可能成功，也可能不成功。如果它失敗了，那就是最初发生了一个扰动，而在几毫秒之后，扰动就消失了，沿着軸突幷沒有扰动的传导。如果它成功了，扰动很快就形成一种标准的形式（近似于标准），幷以此形式沿着軸突传导。这就是說，如上所述，

这一标准的神經脉冲将沿着軸突移动，看来，不管誘发过程的具体細节如何，神經脉冲在表現形式上是相当地独立的。

神經脉冲的刺激，一般产生在神經細胞的細胞体內或其附近。它的传导，則是沿着軸突进行的。

由脉冲引起的刺激脉冲的机制，它的数字特性

我現在可以回到这一机制的数字性质上面来。神經脉冲可以很清楚地看作是两值符号，它的含意是：无脉冲时表示一个值（在二进制数字中为0），脉冲出現时表示另一个值（在二进制数字中为1）。当然，它应該被描述为在某一特定軸突上的变化（或者，不如說是在某一特定神經元上各軸突的变化），并且，可能在相关于其他事件的一个特定时間內。因此，它們可以用一种特殊的、邏輯作用的符号（二进制数字中的0或1）来表示。

上面已經讲过，在給定神經元的軸突上发生的脉冲，一般是由冲击在神經元細胞体上的其他脉冲所激发的。这个刺激，通常是有条件的，就是說，只有这些原发脉冲的一定組合和同步性，才能激发出我們所讲过的派生脉冲，而其他条件是产生不了这种激发作用的。这就是說，神經元是一个能够接受并发出一定的物理实体（脉冲）的器官。当它接受那些具有一定組合和同步性的脉冲时，它会被刺激而产生自己的脉冲；反之，它就不能发出自己的脉冲。描述对哪一类脉冲作出什么反应的規律，也就是支配这个作为作用器官的神經元的規律。

很明显，对数字計算机中一个器官的功能之描述，对数字器官作用与功能的描述，都已經特征化了。这就支持了我們原先的断定：神經系統具有着一种“最初看見的”① 数字特性。

① 这个詞，作者用了一句拉丁文——prima facie，按字典的詮释，原意是第一次

让我对“最初看見的”这个形容詞多說几句。上述描述，包含着某些理想化与簡化，这在后面我們还要討論的。如果考虑到这些情况，神經系統的数字性质，就不是那么清楚与毫无疑問的了。但是，我們在前面所强調的那些特点，的确是首要的显著的特点。所以，我从强調神經系統的数字特性来开始本章的討論，看来还是比較适宜的。

神經反应、疲乏和恢复的时間特性

在討論本題之前，需要对神經細胞的大小、功率消耗和速度等等，作出若干定向性的評述。当我們把神經細胞与它的主要的“人造对手”(現代的邏輯与計算机器之典型作用器官)相比較时，这些情况特别有启发意义。这些人造的典型作用器官，当然就是真空管和最近发展起来的晶体管了。

上面已經讲过，神經細胞的刺激，一般都在它的細胞体附近发生。事实上，一个完全的正常的刺激，可以沿着一条軸突进行。就是說，一个适当的电位的或化学的刺激，如果适当地集中而施加到軸突的一点上，将在那里引起一个扰动，它很快就会发展为一个标准的脉冲，从被刺激的点，沿着軸突向上和向下进行。上面所讲的通常的刺激，往往发生在从細胞体伸展出来一組分支附近，虽然这些分支的尺寸更小，但它基本上还是軸突，刺激从这組分支传到神經細胞体去，(然后又传到正常的軸突上去)。这一組刺激接收器，叫做树状突起(dendrites)。由其他脉冲(或其他多个脉冲)而来的正常的刺激，是从传导这脉冲的軸突(或多个軸突)的一个特殊末端发射出来的。这个末端叫做**突触**(synapse)。(一个脉冲，不管它

看見或第一次观察(on the first view)。作者这样說，是因为按本书以后的分析，神經系統的数字性质并不是完全沒有問題的。——譯注

只能通过一个突触引起刺激，或者是当它沿軸突传导时，它都可以直接刺激别的軸突，只有封閉的軸突除外。这个問題，在这里不需要討論。但从这一現象来說，是有利于这样一个短路过程的假定的。）刺激穿过突触的时間，大約是 10^{-4} 秒的几倍。这个时間被定义为：从脉冲抵达突触开始，一直到在被刺激的神經元的軸突之最近点上发生刺激脉冲为止。但是，如果我們把神經元作为邏輯机的作用器官来看，上述規定并不是表示神經元反应时間的最有意义的方法。理由是：当刺激脉冲实現之后，被刺激的神經元并不能立即恢复到它原有的、被刺激前的状态。这就叫做**疲乏**，即：它不能立即接受另一脉冲的刺激，不能作出标准的反应。从机器的經济观点来說，更重要的是量度这样一个速度：当一个引起了标准反应的刺激发生之后，需要多少时間，另一刺激才能引起另一个标准反应。这个时間，大約为 1.5×10^{-2} 秒。从以上两个不同数字，很明显地可以看出，实际上刺激通过突触的时間，只需要这个时間（10^{-2} 秒）的百分之一、二，其余时間都是恢复时間，即神經元从刺激刚过后的疲乏状态恢复到在刺激前的正常状态。应該指出，疲乏的恢复，是逐漸的，在更早一点的时間（大約在 0.5×10^{-2} 秒时），神經元就能够以非标准的形式作出反应，也就是說，它也可以产生一个标准的反应，不过必須新的刺激比在标准条件下所需要的刺激更加强烈。这种情形，还具有更加广泛的意义，在后面我們还要再讲到的。

因此，讲到神經元的反应时間，要看我們采用什么样的定义，大体上在 10^{-4} 到 10^{-2} 秒之間，而后面的那个定义，意义更大一些。和这个时間相比，在大型邏輯机中使用的現代眞空管和晶体管，它們的反应时間約在 10^{-6} 和 10^{-7} 秒左右（当然，我在这里也是指完全恢复时間，即器官恢复到它的刺激前状态的时間）。这就是說，在

这方面，我們的人造元件比相应的天然元件优越，大約快 10^4～10^5 倍左右。

至于大小尺寸的比較，就和这个結論很不相同。估計大小的途徑有許多，但是最好的方法还是拿它們一个一个地估計。

神經元的大小，它和人造元件的比較

神經元的綫形尺寸，对这一种神經細胞和对另一种神經細胞，是各不相同的。某些神經細胞，彼此很紧密地集合成一大团，因此，軸突就很短；而另外一些神經細胞，要在人体中距离較远的部分之間传递脉冲，因而它們的綫形长度可以与整个人体的长度相比較。为了要得到不含糊的和有意义的比較，一个办法是把神經細胞中邏輯作用部分与眞空管、晶体管的邏輯作用部分相比。对于神經細胞，邏輯作用部分是細胞膜，它的厚度大約是 10^{-5} 厘米的几倍。至于眞空管的邏輯作用部分，是柵极到阴极的距离，大約是10^{-1} 厘米到10^{-2} 厘米的几倍；对晶体管来說，这就是“触鬚电极”間的距离，即非欧姆电极——“发射极”和“控制电极”的距离，大約为这些零件的直接作用环境的三分之一，其数值約为略小于 10^{-2} 厘米。因此，从綫形尺寸来說，天然元件要比我們的人造元件小 10^3 倍左右。

其次，比較它們的体积也是可能的。中央神經系統所占空間，大約是处在一公升左右的数量級上（在人脑中），亦即 10^3 立方厘米。在中央神經系統中所包括的神經元数目，一般估計在 10^{10} 个的数量級上，或者还要多一些。因此，每个神經原的体积，可估算为 10^{-7} 立方厘米。

眞空管或晶体管的装配密度，也是可以估計的，虽則这一估計并不能絕对地毫无疑問。看来，在双方的比較中，各个眞空管或晶

体管装配起来的密度，要比单一元件的实际体积，能够更好地衡量元件大小的效率。按今天的技术水平，把几千个眞空管装配在一起，大約需要占据几十立方呎的容积；而把几千个晶体管装配在一起，則需要占据一个或几个立方呎的容积。以后者（晶体管）的数字，作为今天的最佳紀录，則几千个(10^3)作用器官需要占据 10^5立方厘米的容积，故每一个作用器官的体积为 $10\sim10^2$ 立方厘米。因此，在占用容积（体积）方面，天然元件比人造元件要小 $10^8\sim10^9$ 倍。把这个比数，同上述綫形尺寸的比数对比时，綫形尺寸的比数，最好是把它看作为体积比数的根据，它应該是体积比数的立方根。把体积比数 $10^8\sim10^9$ 开立方，其立方根是 $0.5\sim1\times10^3$，这个推算結果，和上节我們直接求得的綫形尺寸比数是相当吻合的。

能量的消耗，与人造元件的比較

最后，应该进行能量消耗的比較。一个作用的邏輯器官，从它的性质来說，是不作任何功的：刺激脉冲，比起它激发起来的脉冲来說，只要有几分之一的能量就足够了。在任何情况下，在这些能量之間，并不存在着內在的与必要的关系。因此，这些元件中的能量，差不多都是散逸了，即轉变为热能而不作相应的机械功。因此，能量的需用量，实际上就是能量的消耗量，所以我們可以談这些器官的消耗量。

在人类的中央神經系統（人脑）中，能量消耗大約在 10 瓦特的数量級。因为人脑中約有 10^{10} 个神經元，所以每个神經元的能量消耗約为 10^{-9} 瓦特。而一个眞空管的典型能量消耗量約在 $5\sim10$ 瓦特的数量級上。一个晶体管的典型能量消耗量約在 10^{-1} 瓦特的数量級上。由此可以看到，天然元件的能量消耗比人造元件要小 $10^8\sim10^9$ 倍。这个比例，和刚才所說的体积比較的比例，是相

同的。

比較的总結

把上面的比較总結一下。按大小对比，天然元件比人造元件的相对比較系数是 $10^8 \sim 10^9$，天然元件远較人造元件优越。这个系数是从綫形尺寸的比例乘立方求得，它們的体积比較和能量消耗比較，也是这个系数。和这个情况相反，人造元件的速度，比天然元件快，两者的比較系数是：人造元件比天然元件快 $10^4 \sim 10^5$ 倍。

我們現在可以根据上述数量的評价来作出一定的結論。当然，应該記住，我們前面的討論还是很肤浅的，因而現在所得出的結論，随着今后討論的展开，将需要作出很多修正。可是，无論如何，值得在現在就提出一定的結論。这几个結論如下：

第一，在同样时間內，在总容量相等的作用器官中（总容量相等，是以体积或能量消耗相等来作定义），天然元件比人造元件所能完成的动作数目，大約要多 10^4 倍。这个系数，是由上面已求得的两个比例数相除而得出来的商数，即 $10^8 \sim 10^9 / 10^4 \sim 10^5$。

第二，这些系数还說明，天然元件比自动机器优越，是它具有更多的但却是速度較慢的器官。而人造元件的情况却相反，它比天然元件具有較少的、但速度較快的器官。所以，一个有效地組織起来的大型的天然的自动系統（如人的神經系統），它希望同时取得尽可能多的邏輯的（或信息的）项目，而且同时对它們进行加工处理。而一个有效地組織起来的大型人造自动机（如大型的現代計算机），則以連續順序地工作为有利，即一个时間內只处理一項，或至少是一个时間內处理的項目不多。这就是說，大型、有效的天然自动机，以高度“并行”的綫路为有利；大型、有效的人造自动机，

則并行的程度要小，宁願以采取“串行”綫路为有利(此处請参閱本书第一部分关于并行与串行綫路的叙述)。

第三，应該注意，并行或串行的运算，并不是随便可以互相替代的（象我們在前面的第一点結論中，为了取得一个单一的“效率評分”，簡单地把天然元件在大小上的有利系数，除以它在速度上的不利系数那样）。更具体地說，并不是任何串行运算都是能够直接变为并行的，因为有些运算只能在另一些其他运算完成之后才能进行，而不能同时进行（即它們必須运用其他运算的結果）。在这种情况下，从串行型式轉換为并行型式，是不可能的，或者是只有在同时变化了它的邏輯途徑和过程的組織之后才有可能。相反地，如果要把并行型式改为串行，也将对自动系統提出新的要求。具体地說，这常常产生出新的記忆需要，因为前面进行的运算的答案，必須先儲存起来，其后的运算才能进行。所以，天然的自动机的邏輯途徑和結构，可能和人造的自动机有相当大的区别。而且，看来人造自动机的記忆要求，需要比天然自动机更有系統、更严密得多。

所有这些观点，在我們以后的討論中，还会再提出的。

第十章　刺激的判据

最簡单的——基本的邏輯判据

我現在能够进而討論在前面叙述神經作用时所作的理想化与簡单化了。我当时就曾經指出，在叙述中是存在着这两方面的，而且在前面簡化掉的內容，并非都是无关宏旨而是应該給以評价的。

正如前面已指出的，神經元的正常輸出，是标准的神經脉冲。

它可以由各种形式的刺激誘发出来，其中包括从其他神經元传递来的一个或多个脉冲。其他可能的刺激，是外界世界的一些現象，这些現象是某些特定的神經元特別敏感的（如光、声、压力、温度等），同时，它們还使这神經元所在的机体发生物理的和化学的变化。我現在从上述第一种情况开始，即从討論其他神經元传递来的刺激脉冲开始。

在前面曾經观察到，这个特定的机制（由于其他神經脉冲的适当組合而引起的神經脉冲刺激），使我們可以把神經元和典型的基本的数字作用器官相比較。进一步說，如果一个神經元，和两个其他神經元的軸突接触（通过它的突触），而且它的最低刺激需求（即引起一个反应脉冲的最小要求）就是两个同时进来的脉冲，則这个神經元实际上就是一个“与”器官，它进行合取的邏輯运算（文字上就是“与”），因为它只在两个刺激同时作用时才能发生反应。另一方面，如果上述神經元的最低刺激需求是仅仅有一个脉冲到达就够了，那么，这个神經元就是一个“或”器官，就是說，它进行析取的邏輯运算（文字上就是“或”），因为在两个刺激之中只要有一个发生作用，就能产生反应。

“与”和“或”是基本的邏輯运算。它們和“无”在一起（“无”是否定的邏輯运算），就构成基本邏輯运算的完整体系。一切其他的邏輯运算，不管多么复杂，都可以从这三者的适当組合而完成。我在这里，将不討論神經元怎样能够刺激出“无”运算，或者我們用什么办法来完全避免这种运算。这里所讲的，已經足以說明前面所强調的推論：如此看来，神經元可以当作是基本的邏輯器官，因而它也是基本的数字器官。

更复杂的刺激判据

但是，这还是对现实情况的一种簡化与理想化。实际的神經元，作为系統中的一部分，并不是这样簡单地組織的。

有一些神經元，在它們的細胞体上，确实只有一、两个(或者只有为数不多的几个)其他神經元的突触。但是，更常見的情况却是一个神經元的細胞体上，有着其他許多神經元軸突的突触。甚至有时有这种情况，一个神經元出来的好几个軸突，形成对其他一个神經元的好几个突触。因而，可能的刺激源是很多的。同时，可能生效的刺激方式，比上述簡单的“与”和“或”的系統具有更加复杂的定义。如果在一个单独的神經細胞上，有許多个突触，則这个神經元的最簡单的行为規律，是只有当它同时地接收到一定的最低要求数目的(或比这更多的)神經脉冲时，才产生反应。但是，很有理由設想，在实际中，神經元的活动情况，要比这个更加复杂。某些神經脉冲的組合之所以能刺激某一給定神經元，可能不只是由于脉冲的数目，而且是由于传递它的突触的空間位置关系。就是說，我們可能遇到在一个神經元上有几百个突触的情况，而刺激的組合之是否有效(使这神經元产生反应脉冲)，不只是由刺激的数目来規定，而且取决于它在神經元的某一特定部位的作用范围(在它的細胞体或树状突起系統上)，取决于这些特定部位之間的位置关系，甚至还取决于有关的更复杂的数量上和几何学上的关系。

閾　值

如果刺激的有效程度的判据是上面讲过的最簡单的一种：(同时地)出現最低需求数目的刺激脉冲，那么，这个最低需求的刺激数目叫做这个神經元的**閾值**。我們經常用这种判据(即閾值)，来

叙述一个給定神經元的刺激需求。可是，必須記住，刺激的需求并不限于这个簡单的特性，它还有着比仅仅是达到閾值（即最小数目的同时刺激）复杂得多的关系。

总和时間

除此之外，神經元的性质，还会显示出其他的复杂性，这是仅仅用标准神經脉冲叙述刺激-反应关系时所沒有讲到的。

我們在上面讲到的“同时性”，它不能也不意味着实际上准确的同时性。在各种情况下，有一段有限的时間——**总和时間**，在这段时間內到达的两个脉冲，仍然象它們是同时到达的那样作用。其实，事情比这里所說的还要复杂，总和时間也可以不是一个非常明确的概念。甚至在稍为长一点的时間以后，前一个脉冲仍然会加到后一个紧接着的脉冲上面去，只不过是在逐渐減弱的和部分的范围內而已。一序列的脉冲，即使已超出总和时間，只要在一定的限度內，由于它們的长度，其效应还是比单独的脉冲大。疲乏和恢复現象的重叠，可以使一个神經元处于非正常的状态，即：它的反应特性和它在标准条件下的反应特性不同。对所有这些現象，已經取得了一批观察結果（虽然这些观察是或多或少地不完全的）。这些观察都指出，单个的神經元可能具有（至少在适当的特殊条件下）一个复杂的机制，比用簡单的基本邏輯运算型式所作出的刺激-反应的教条式叙述，要复杂得多。

接收器的刺激判据

除了由于其他神經元的輸出（神經脉冲）而引起的神經元刺激之外，对于其他神經元刺激的因素，我們只需要說几件事情。正如已經討論过的，这些其他因素是外界世界的現象（即在机体表面的

現象)，对这些現象，某些特定的神經元是特别敏感的(如光、声、压力、温度等)，并在这神經元所在的机体內引起物理的与化学的变化。对其他神經元的輸出脉冲能作出反应的神經元，通常叫做**接收器**。但是，我們可以更适当地把能够对其他刺激因素作出反应的神經元，也叫做**接收器**。并且对这两类范疇的神經元，分别称为**外**接收器和**內**接收器以示区别。

从上述情况，刺激判据的問題又重新发生了。現在，需要給出在什么条件下，神經脉冲的刺激才发生作用的判据。

最簡单的刺激判据，仍然是用**閾値**表示的判据，这就是前面讲过的由于神經脉冲而引起的神經元刺激的情况。这就是說，刺激的有效性之判据，可以用刺激因子的最小强度来表示。比如，对于外接收器来說，这种判据是光照的最小强度，或在一定的频率带內所包含的声能的最小强度，或过压力的最小强度，或溫度升高的最小强度等等。或者，对內接收器来說，是临界化学因素集中的最小变化，相关物理参数值的最小变化等等。

但是，应該注意，閾値的刺激判据，不是唯一可能的判据。在光学現象中，許多神經元所具有的反应，是对光照度变化的反应(有时是从亮到暗，有时是从暗到亮)，而不是对光照度达到的特定水平。这些反应，可能不是一个单独的神經元的，而是在更复杂的神經系統中神經元的輸出。我不拟在这里詳細討論这个問題。观察上述已有的論据，已足以指出，对接收器来說，閾値的刺激判据，不是在神經系統中唯一的判据。

現在，让我重复一下上面所讲的典型例子。我們都知道，在感光神經中，某些神經纖維不是对光照的任何特定(最小)水平作出反应，而是只对水平的变化产生反应；就是說，在某些神經纖維中，是由于从暗到亮发生反应，有些則是由于从亮到暗发生反应。換

句話說，形成刺激判据的，是水平的增长或减低，即水平的微商之大小，而不是水平本身之高低。

神經系統的这些“复杂性”对神經系統功能結构及对功能的作用，看来应当在这里讲一下。有一种看法是：我們很可以想象，这些复杂性沒有起到任何功能上的作用。但是，我們应該更有兴趣地指出，我們可以想象这些复杂性有着功能上的作用。应該对这些可能性說几点。

我們可以設想，在基本上是按数字原則組織的神經系統中，上述复杂性会起着“模拟”的作用，或至少是“混合”式的作用。曾經有人提出，由于这些机制，有着更为奥妙的綜合的电效应，可能对神經系統的功能发生影响。在这里，某些一般的电位起着重要的作用，神經系統則按电位理論問題的解答而作出反应。这些問題比通常用数字判据、刺激判据等来描述的問題，具有更基本的、不那么直接的性质。由于神經系統的特性仍然可能基本上就是数字性质的，因此，上述这些效应如果眞是存在的話，它們会和数字效应相互作用；这就是說，它可能是一种“混合系統”的問題，而不是一个純粹的模拟系統的問題。好几位作者很热心地沿着这个方向作出种种推測，如果在一般文献中，应該引述这些作者的工作；但是，在这里，我就不准备用专門术語来进一步討論这个問題了。

上述的这种类型的复杂性，如果象前面讲过的那样，用基本作用器官的数目来說，可以說，一个神經細胞不只是一个单一的基本作用器官；計算这些作用器官数目的任何有意义的努力，都使我們认識这一点。很明显地，甚至比較复杂的刺激判据，也具有这个效应。如果神經細胞被細胞体上各突触的一定組合的刺激所作用（而不是被別的形式的刺激所作用），那么，基本作用器官的数目，必須推定为突触数目，而不是神經細胞的数目。如果上述“混合”

型的現象被进一步地澄清了，这种作用器官数目的計算还要更困难一些。用突触的数目来代替神經細胞的数目，会使基本作用器官的数目增加相当大的倍数，比如10倍到100倍。这种情况，当我們考虑基本作用器官的数目时，是应該記住的。

虽然，我們現在已經讲过的各个复杂性，可能是不相关的，但是，它們会給系統带来部分地模拟的性质，或者一种混合的性质。在任何情况下，这些复杂性都会增加基本作用器官的数目，如果这个数目是由任何相当的判据所决定的話。这个增加，可能是大約10倍到100倍。

第十一章　神經系統內的記忆問題

我們的討論，直到現在，还未考虑到一种元件，它在神經系統中的存在是具有相当根据的，如果不是已經肯定了的話。这种元件在一切人造計算机中起着极其重要的作用，而且它的意义，可能是原則上的而不是偶然的。这种元件就是**記忆**。因此，我現在要討論在神經系統中的这个元件，或者更准确地說，是这个組件。

刚才說过，在神經系統內，存在着一个記忆部分（或者，也可能是几个記忆部分）。这是一种推測和假設，但是，我們在人造計算自动机方面的所有經驗，都提出了和证实了这个推测。同样，在討論开始时，我們应該承认，关于这个組件（或这些組件）的本质、物理体現及其位置，都还是一个假說。我們还不知道，从实物上来看，神經系統中的記忆器官究竟在哪里？我們也不知道，記忆是一个独立的器官呢，还是其他已知器官的特定部分之集合？它也許存在于一个特殊的神經系統中，而且这可能是一个相当大的系統。

它可能和細胞体的遺传学机制有某些关系。总而言之，我們对記忆的本质及其位置，現在仍然是无知的，象古希腊人以为心臟在横隔膜里面一样无知。我們所知道的唯一事情，就是在神經系統中，一定有着相当大容量的記忆；因为很难相信，象人类的神經系統这样复杂的自动机，怎么能够沒有一个大容量記忆。

估計神經系統中記忆容量的原理

让我談一下这个記忆可能有的容量。

对于人造自动机（如計算机），已經有了相当一致的确定記忆"容量"的标准方法。因此，把这个方法推广到神經系統上面来，看来也是合理的。一个記忆，能够保持一定的最大数量的信息，而信息都能够轉换成为二进位数字的集合，它的单位叫做"位"(bit)*。对一个能够保存一千个十进制的 8 位数目字的記忆，我們說，它的容量是 $1{,}000\times 8\times 3.32\cong 2.66\times 10^4$ 位。因为一个十进制数字，大体相当于 $\log_2 10\cong 3.32$ 位。（上述十进制数字轉换为位的方法，是由G. E.申南〔G. E. Shannon〕和其他学者在关于信息論的經典著作中建立的。）很明显，十进制的三位数字，大約相当于 10 位，因为 $2^{10}=1{,}024$，这个数近似于10^3。（故按此計算，一个十进制数字，大致相当于 $\frac{10}{3}\cong 3.33$ 位。）所以，上例中記忆的容量是 2.66×10^4 位。根据同样的推理，一个印刷体或打字机体字母的信息容量是 $\log_2 88\cong 6.45$ 位（一个字母，有 $2\times 26+35=88$ 个选择。式中的 2 是表示大写或小写两种可能；26是字母的数目；35是常用的标点符号、数学符号和間隔的数目。当然，上述这些数目是和信息的文字內容有关系的）。所以，一个保持一千个字母的記忆，其容量即为

* bit，即二进制的位，在計算技术名詞中簡称为"位"。——譯注

$6,450=6.45\times10^3$位。按照同样的概念，对于更复杂的信息的記忆容量，也是可以用这个标准信息单位——位来表示的，比如对几何形状的記忆容量（当然，給定的几何形状必須具有一定程度的准确幷且是肯定了的），或对顏色差別的記忆容量（其要求与上述对几何形状的相同）等等。按照上述原理，我們就可以运用簡单的加法，計算各类信息的各个組合数目，从而規定它們的記忆容量。

运用上述規則估計記忆容量

一台現代計算机所需要的記忆容量，一般約在10^5到10^6位的数量級上。至于神經系統功能所需要的記忆容量，据推測要比計算机的記忆容量大得多。因为我們在前面已經看到，神經系統是比人造自动机（如計算机）大得多的自动系統。神經系統的記忆容量，比上面这个10^5到10^6位的数字究竟要大多少，我們現在还很难說。但是，提出一些粗略的定向性的估計，还是可以做得到的。

一个标准的接收器，大約每秒可以接受14个不同的数字印象，我們可以把它算作是同样数目的位（即14位）。这样，假定10^{10}个神經細胞都是在适当情况下作为接收器（內接收器或外接收器），則每秒钟的信息总輸入为14×10^{10}位。我們还进一步假定，在神經系統中幷沒有眞正的遺忘，我們所接受的印象会从神經活动中的重要領域里（即注意力中心）轉移出去，但是它幷沒有眞正被完全抹去（关于这个假定，已經有了一些证据）。那么，我們就需要估計一个通常的人类的生活期間，比如說，我們算这个期間是60年吧，这就是2×10^9秒左右。按照上节的推算方法，在这期間需要的总記忆容量則为：$14\times10^{10}\times2\times10^9=2.8\times10^{20}$位。这个容量，比我們承认的現代計算机的典型記忆容量10^5到10^6位大得多了。神經系統的記忆容量比計算机超过这么多的数量級，看来也

不是不合理的，因为我們在前面已經观察到，神經系統的基本作用器官的数目，与計算机的相比，也是超过許多个数量級的。

記忆的各种可能的物理体現

記忆的物质体現，还是一个未解决的問題。对于这个問題，許多作者提出了許多不同的解答。有人假設，各个不同神經細胞的閾值（或者更广泛地說，刺激判据），是随时間而变化的，它是这个細胞的以前历史的函数。因此，經常使用一个神經細胞，会降低它的閾值，就是說，减低它的刺激需求，等等。如果这个假設是真的話，記忆就存在于刺激判据的可变性之中。这无疑是一种可能性，但是我在这里不准备去討論这个問題。

这个概念的一个更强烈的表現，是假定神經細胞的連接（即传导軸突的分布）随时間而变化。这就意味着以下的状况是存在的。一个軸突如果长久废弃不用，在后来用时就会不发生作用了。另一方面，如果很頻繁地（比起正常使用来說）使用一个軸突，那么，就会在这个特定的途徑上形成一个有着較低的閾值（过敏的刺激判据）的連接。在这种情况下，神經系統的某一部分就会随时間及其以前的历史而变化，这样，它自己就代表着記忆。

記忆的另一种形式，它是明显地存在的，是細胞体的遺传部分：染色体以及組成它的基因显然是記忆要素，它們的状态，影响着并在一定程度上决定着整个系統的功能。因此，可能存在着一个遺传的記忆系統。

此外，可能还有一些其他的記忆形式，其中的一些也是似乎頗有道理的。在細胞体的一定面积上，有某些特殊的化合物，它們是可以自我保持不变的，这也可能是記忆的要素。人們可以設想，这是一种記忆，如果他认为有遺传的記忆系統的話。因为在基因中

存在的这些自我保持不变的性质，看来也可以位于基因之外，即在細胞的其他部分。

在这里，我就不列举所有这些可能的推测了，虽然这些其他的許多可能性，和上面所說的可能性具有相等的、甚至是更多的道理。我只在这里指出，虽然我們还不能找到記忆究竟在神經細胞的哪一些特殊部分，但是，我們仍然能够提出記忆的許多种物理体現，而且这些推断都有着不同程度的理由。

和人造計算机相比拟

最后，我应該說明，各个神經細胞系統，彼此通过各个可能的循环途徑相互刺激，也可以构成記忆。这就是由作用要素（神經細胞）做成的記忆。在我們的計算机技术中，这类記忆是常常使用的，并且具有重要意义。事实上，它还是首先在計算机上采用的一种記忆形式。在眞空管型的計算机中，“触发器”就是这种記忆的元件。这些触发器是成对的眞空管，相互起着开关和控制的作用。在晶体管技术中，实际上还在其他各种型式的高速电子技术中，都允許和要求使用这些像触发器一类的組件，这些組件，正如早期眞空管計算机中的触发器一样，也可以作記忆要素之用。

記忆的基础元件不需要和基本作用器官的元件相同

必須注意，神經系統使用基本作用器官作为記忆元件，是不适宜的。这样的記忆，可以标志为“用基本作用器官組成的記忆”，它从各方面的意义来說，都是很浪費的。但是，現代的計算机技术却是从这样的装置开始的。第一台大型的眞空管計算机 ENIAC 的第一級記忆（即最快和最直接的記忆），就是完全运用触发器的。然而，ENIAC 虽然是很大型的計算机（有 22,000 个眞空管），但从

今天的标准来看，它的第一級記忆的容量却是很小（只保持几打10位的十进制数字）。这样的記忆容量，只不过相当于几百个位，肯定小于10^3位。今天的計算机，为要在計算机的規模和記忆容量之間保持适当的平衡，它大体上有10^4个基本作用元素，而記忆容量則为10^5至10^6位。达到这个要求，是靠运用在技术上与基本作用器官完全不同的記忆方式。眞空管的或晶体管的計算机，它的記忆都是用一种靜电系統（阴极射綫管），或者用經过适当布置的大量的铁磁芯等。在这里，我将不作出这些記忆方式的完全分类，因为还有其他的重要的記忆方式，很不容易归入这些分类，比如，声延迟式、铁电体式、磁致伸縮延迟式等等（这里所列举的方式，还可以大大增加）。我在这里只不过企图指出，記忆部分所使用的元件，是和基本作用器官的元件完全不同的。

上述这些事实，对于我們理解神經系統的結构，看来是非常重要的。这个問題，現在还是基本上沒有得到解答。我們已經知道神經系統的基本作用器官（神經細胞）。所以，我們很有理由相信，一个容量很大的記忆是和这个系統联合在一起的。但是，我們应該极大地强調，我們現在还不知道，神經系統的記忆基本元件，它們的物理实体究竟是什么型式的。

第十二章　神經系統的数字部分和模拟部分

我們在上面已經指出神經系統記忆部分的若干深入广泛的根本問題，現在最好是进而討論其它的題目了。但是，对于神經系統中尙不清楚的記忆組件，还有一个比較次要的方面，应該在这里說

几句。这就是关于神經系統中模拟部分与数字部分(或“混合”部分)間的关系。对于这些問題,我将在下面作一个簡短的、不完备的补充討論,然后,我們就进入与記忆无关的問題的探討了。

在这里,我想观察的問題是:在神經系統中的过程,它的性质可以变化,从数字的变为模拟的,从模拟的又变回来成为数字的,如此反复变化,这是我們在前面指出过的。神經脉冲(即神經机制中的数字部分),可以控制这样一个过程的特别阶段:比如某一特定肌肉的收缩或某一特定化学物质的分泌。这个現象,是属于模拟类型的,但它可能是神經脉冲序列的根源;由于适当的內接收器感受到这个現象而发生脉冲。当这样的脉冲发生之后,我們又回到过程的数字方面来了。刚才說过,从数字过程变为模拟过程,又从模拟过程变回到数字过程,这样的变化,可以往复好几次。所以說,系統中的神經脉冲部分,其性质是数字的;而系統中化学的变化或机械的位置变化(由于肌肉收縮),則是属于模拟的性质,这两者互相变换,因而使任何特定的过程带上混合的性质。

遺传机制在上述問題中的作用

在上面所讲的过程中,遺传現象起着特别典型的作用。基因本身,很显然地是数字系統元件的一部分。但是,基因所发生的各个效应,包括刺激形成一些特殊的化学物质,即各种特定的酶(它是基因的标志),而这却是属于模拟的領域的。这就是模拟和数字过程的相互变化的一个特别显著的例子。也就是說,基因可以归入模拟和数字交互变化类型中的一个因素;这个更广闊的类型,我們在上节中已經更概括地談过了。

第十三章　代碼，及其在机器功能的控制中之作用

让我們現在轉入記忆以外的其他問題。我要讲的是組織成邏輯指令的某些原理。这些原理，在任何复杂自动系統的功能中，都是相当重要的。

首先，我要引入討論这个問題所需要的一个术語。使一个自动机能够承接并按此完成若干有組織的任务的邏輯指令系統，就叫做**代碼**。所謂邏輯指令，是指象在适当的軸突上出現的神經脉冲之类的东西，事实上，这可以指任何誘发一个数字邏輯系統（如神經系統）并使它能够重复地、有目的地作用的东西。

完全碼的概念

在讲到代碼时，下列的代碼的区分問題就突出来了。一个代碼，可以是**完全的**，用神經脉冲的术語来說，它規定了一序列的脉冲和发生脉冲的軸突。这种完全碼，完全規定了神經系統的一定的行为，或者，正如上面比較过的那样，規定了相应的人造自动机的一定行为。在計算机中，这些完全碼是許多指令組，它給出了一切必要的規則。如果自动机要通过計算解出一个特定的問題，它必須由一套完全碼来控制。現代計算机的运用，要依仗使用者的一种能力：发展和規定出任何給定問題（这个問題是要这个机器解算的）所必需的完全碼。

短碼的概念

和完全碼相对的，还存在着另一类代碼，我們最好把它叫做

短碼。它是根据以下的概念形成的。

英国的邏輯学家 R. 图灵在 1927 年证明（在图灵以后，許多計算机专家把图灵的原理以各种特定方法用于实践）：有可能发展一种代碼指令系統，这种指令能够使一个計算机象另一个特定的計算机那样操作。这种使一个計算机**模仿**另一計算机的操作的指令系統，就叫做**短碼**。让我們現在稍为具体地来討論这些短碼的发展及其运用的典型問題。

我已經讲过，一个計算机是被代碼、符号序列（通常是二进制符号，即一序列位）所控制的。在任何支配某特定計算机的运用的指令中，必須明确：哪些位（一序列的信息）是机器的指令，这些指令将使机器做些什么？

对于两个不同的計算机来說，这些**有意义**的位序列（二进制信息序列）是不必相同的，它們对于各自相应的計算机运算的作用，也是可以完全不相同的。所以，如果对一个机器，給以一組专用于另一个机器的指令，这样，对这个机器来說，这些指令就是**无意义的**（至少是部分地无意义的）。也就是說，这些信息序列，对于这台机器来說，是不完全属于**有意义的**信息序列的范围。或者，如果这台机器"服从"这些无意义的指令时，这些指令会使它作出在原来設計为解出某一問題的組織方案以外的操作。一般地說，它将使这台机器不能进行有目的的操作；这种操作是解决一个具体的、有組織的任务，即解出需要解算的問題的答案所要求的。

短碼的功能

按照图灵的方案，一个代碼，如果要使一台机器象另一台特定的机器那样操作的話（即：使前者**模仿**后者），必須要做到以下各点。它必須包括这样的指令（指令是代碼的进一步的具体細节，这

个指令是这台机器所能理解并有目的地服从的)，它能够使机器检查每一个收到的指令，并决定这个指令是否具有适用于第二台机器的結构。它必須包括足够的指令(用第一机器的指令系統表达)，使这台机器发生动作，这些动作，和第二台机器在这一指令影响之下发生的动作相同。

上述图灵方案的一个重要結果是：用这个方法，第一台机器可以模仿**任何**其他一台机器的行为。这种使机器跟着另一台机器做的指令結构，可能和第一台机器所实际包含的一种特性完全不同。就是說，这种指令結构的性质，实际上可以比第一台机器所具有的性质复杂得多，即：第二台机器的指令中的每一个指令，可以包括第一台机器所完成的許多次运算。它可以包括复杂的、重复的过程和任何多次的动作。一般地說，第一台机器在任何时間长度內和在任何复杂程度的可能的指令系統控制之下，能够完成任何运算，只要这些运算是由"基本"的操作构成的就成(所謂基本的操作，就是指基础的、非复合的和原始的操作)。

把这种派生的代碼，叫做短碼，是由于历史的原因。这些**短碼**，当初是作为編碼的輔助方法发展起来的。由于需要給一台机器編出比它自己本来的指令系統更簡短的代碼，因此，就用这样的处理方法：把它当作是一台完全不同的机器，这台机器具有更方便的、更充分的指令系統，它能允許更簡单、不那么瑣碎的、更直率的編碼。

第十四章　神經系統的邏輯結构

現在，我們的討論最好再引向其他复杂的問題。我前面讲过，

这就是和記忆或和完全碼与短碼无关的問題。这些問題，是有关于任何复杂自动系統(特别是神經系統)的功能中邏輯学和算术的作用。

数字方法的重要性

这里要討論的一个相当重要的問題，是这样的：任何为人类所使用，特别是为控制复杂过程使用而建造起来的人造自动化系統，一般都具有純粹邏輯的部分和算术部分，也就是說，一个算术过程完全不起作用的部分和一个算术过程起着重要作用的部分。这是由于这样的事实：按照我們思惟的习惯和表达思惟的习慣，如果要表达任何眞正复杂的情况而不依賴公式和数字，是极其困难的。

一个自动化系統，要控制象恒定的温度、或恒定的压力、或人体内化学平衡等类型的問題，如果一个人类的設計者要把这些任务列成公式时，他就必須运用数字的等式或不等式来表达这些任务。

数字方法和邏輯的相互作用

而在另一方面，要完成上述任务，又必須有和数字关系无关的方面，即必須有純粹的邏輯方面。这就是某些定性的原理，包括不依賴数字表达的生理反应或不反应，比如我們只需要定性地叙述：在什么环境条件的組合下，会发生什么事件，而哪些条件的組合，則是不需要的。

預計需要高准确度的理由

上述叙述說明，神經系統，当被看作是一个自动系統时，肯定具有算术的部分和邏輯的部分，而且算术的需要，和邏輯的需要同

样重要。这意味着說，在研究神經系統时，从一定意义上来說，我們是和計算机打交道，同时，用計算机理論中熟悉的概念来討論神經系統，也是需要的。

用这样的观点来看，立刻就会出現以下的問題：当我們把神經系統看作是一台計算机时，神經系統中的算术部分，需要有什么样的准确度呢？

这个問題之所以极为重要，是由于以下理由：所有我們在計算机上面的經驗都证明，如果一台計算机，要处理象神經系統所处理的那些复杂的算术任务，很明显，計算机必須要由准确度水平相当高的装置組成。原因是計算的过程是很长的，在很长的計算过程中，各个步驟的誤差不但会相加起来，而且，在前面的計算誤差还会被后面的各个部分所放大。因此，計算机所需要达到的准确度水平，要比这个計算問題的物理本质所要求的准确度水平高得相当多。

因此，人們可以作出这样一种推测：当神經系統被看作是一台計算机时，它必須有算术的部分，而且，它必須以相当高的准确度来进行运算。因为在我們所熟悉的人造計算机中，在复杂的条件下，准确度需要达到10位或12位的十进制数字，这还是不算过分的。

上面这个推测結論，肯定是不合道理的。虽然这样，或者說正是由于这样，我們值得把这样的推論提出来。

第十五章　使用的記数系統之本质：它不是数字的而是統計的

前面已指出过，我們知道了神經系統怎样传送数字材料的一

些事情。它們通常是用周期性的或近似周期性的脉冲序列来传送的。对接收器施加的每一个强烈的激励，会使接收器在絕对失效限度过去之后每次很快地作出反应。一个較弱的激励，也将使接收器以周期性或近似周期性的方法来反应，但是反应脉冲的頻率比較低，因为，在下一个反应成为可能之前，不仅要等絕对失效限度过去，而且甚至要一定的相对失效限度过去之后才能再有反应。因此，定量的激励之强度，是由周期性的或近似周期性的脉冲序列来表示的，而脉冲的頻率，則恒为激励强度的单調函数。这是一种信号的調頻系統，信号强度被表达为頻率。这些事实，人們在視觉神經的某些神經纖維中直接观察到了，同时，在传送关于压力的信息的神經中，也直接观察到这些現象。

值得注意的是：上面所讲的頻率，不是直接等于刺激的任何强度，而是刺激强度的单調函数。这就可以引进各种标度效应，并且可以很方便而恰当地用这些标度来作出准确度的表达式。

应該注意，上面所讲的頻率，一般在每秒 50 至 200 个脉冲左右。

很清楚，在这些条件下，象我們在上面讲到的那种精确度（10 位至 20 位十进制数字！）是超出可能范围的了。因此，神經系統是这样一台計算机，它在一个相当低的准确度水平上，进行非常复杂的工作。根据刚才說的，它只可能达到 2 位至 3 位十进制数字的准确度水平。这个事实，必須再三强調，因为我們还不知道，有哪一种計算机在这样低的准确度水平上却能可靠地、有意义地进行运算的。

我們还要指出另一个事实。上述系統不但带来較低的准确度水平，而且，它还有相当高水平的可靠程度。很显然，在一个数字系統的記数中，如果失掉了一个脉冲，那么，其結果必然是信息的

意义完全歪曲了，就是說，成为无意义的。但是，如果上面所讲的这一种类型的系統，即使失掉了一个脉冲，甚至失掉了好几个脉冲（或者是不必要地、錯誤地插入了一些脉冲），其結果是：与此有关的频率（即信息的意义）只是有一点不要紧的畸变而已。

現在，就产生了一个需要解答的重要問題：对于神經系統，作为計算机，从它的算术結构和邏輯結构的相互矛盾的現象中，我們可以得出什么重要推論来呢？

算术运算中的恶化現象；算术深度和邏輯深度的作用

上面提出的这个問題，对于曾經研究过在一长串計算过程中准确度的恶化現象的人来說，答案是很清楚的。如上所述，这种恶化，是由于誤差叠加起来的**积累**，更重要的是由于前面計算的誤差被后面各計算步驟所**放大**了。这种誤差的放大，原因在于这些步驟相当多的算术运算是順次串行的，换句話說，在于运算过程的“算术深度”很大。

許多运算按順序系列进行的事实，不只是这种程序的算术結构的特点，而且也是它的邏輯結构的特点。这就可以說，准确度的恶化現象，和前面讲过的情况一样，也是由于运算程序的很大的“邏輯深度”而产生的。

算术的准确度或邏輯的可靠度，它們的相互轉換

应該指出，正如前面讲过的，神經系統中所使用的信息系統，其本质是**統計**性质的。换句話說，它不是規定的符号、数字的精确位置的問題，而是信息出現的統計性质問題，即周期性或近似周期性的脉冲序列的频率問題等等。

所以，看来神經系統所运用的記数系統，和我們所熟悉的一般的算术和数学的系統根本不同。它不是一种准确的符号系統，在符号系統中，符号的記数位置、符号的出現或不出現等，对消息的意义具有决定性。它是一种另外的記数系統，消息的意义由消息的**統計**性质来传送。我們已經看到，这种办法怎样带来了較低的算术准确度水平，但却得到較高的邏輯可靠度水平。就是說，算术上的恶化，換来了邏輯上的改进。

可以运用的信息系統的其他統計特性

从上面已經讲过的內容，很明显地提出了另一个問題。我們已經說过，一定的周期性或近似周期性的脉冲序列，传送着**消息**，亦即**信息**。这是消息的显著的**統計**性质。是不是还有其他的統計性质可以同样地作为传送信息的工具呢？

到目前为止，用来传送信息的消息，它的唯一統計性质，就是脉冲的頻率(每秒钟的脉冲数)，我們已經知道，消息是一种周期性或近似周期性的脉冲序列。

很明显，消息的其他統計特性也是可以被运用的：刚才讲的頻率，是一个单一的脉冲序列的性质，但是，每一个有关的神經，都包含有大量的神經纖維，而每一根神經纖維，都能传送許多的脉冲序列。所以，完全有理由設想，这些脉冲序列之間的一定的(統計的)关系，也是可以传送信息的。在这一点上，我們很自然地会想到各种相关系数以及諸如此类的办法。

第十六章　人脑的語言不是数学的語言

继續追踪这个課題，使我們必須探討語言的問題。我曾指出，神經系統是基于两种类型的通訊方式的。一种是不包含有算术形式体系的，一种是算术形式体系的。这就是說：一种是指令的通訊（邏輯的通訊），一种是数字的通訊（算术的通訊）。前者可以用語言叙述，而后者則是数学的叙述。

我們应該认識：語言在很大程度上只是历史的事件。人类的多种基本語言，是以各种不同的形式，传統地传遞給我們的。这些語言的多样性，证明在这些語言里，并沒有什么絕对的和必要的东西。正象希腊語或梵語只是历史的事实而不是絕对的邏輯的必要一样，我們也只能合理地假定，邏輯和数学也同样是历史的、偶然的表达形式。它們可以有其他的本质上的变异，就是說，它們也可以存在于我們所熟悉的形式以外的其他形式之中。确实地，中央神經系統的本质及其所传送的信息系統的本质，都指明了它們是这样的。我們現在已經积累了足够的证据，不論中央神經系統用什么語言，但是它的标志是：它比我們慣常的邏輯深度和算术深度都要小。下面是一个最明显的例子。人类眼睛上的視网膜，对于眼睛所感受到的視像，进行了相当的重新組織。这种重新組織，是在視网膜面上实現的；或者更准确地說，是在視觉神經入口的点上，由三个順序相連的突触实現的；这就是說，只有三个連續的邏輯步驟。在中央神經系統的算术部分所用的消息系統中，其統計性质和它的低准确度也指出：准确度的恶化（前面已經讲过），在这信息系統中也进行得不远。由此可知，这里存在着另外一种邏輯

結构，它和我們在邏輯学、数学中通常使用的邏輯結构是不同的。前面也讲过，这种不同的邏輯結构，其标志是更小的邏輯深度和算术深度（这比我們在其他同样条件下所用的邏輯深度和算术深度小得多）。因此，中央神經系統中的邏輯学和数学，当我們把它作为語言来看时，它一定在結构上和我們日常經驗中的語言有着本质上的不同。

还应該指出，这里所說的神經系統中的語言，可能相当于我們前面讲过的短碼，而不是相当于完全碼。当我們讲到数学时，我們是討論一种**第二**語言，它是建筑在中央神經系統所眞正使用的**第一**語言的基础之上的。因此，对評价中央神經系統**眞正**使用什么样的数学語言或邏輯語言的观点来說，**我們的**数学的外在形式，并不是完全相当的。但是，上面关于可靠度和邏輯深度、数学深度的評論证明：无論这个系統如何，把我們所自觉地、明确地认为是数学的东西，和这个系統适当地区分开来，这是不会錯的。

附录　关于本书著者馮·諾意曼

馮·諾意曼于1903年生于布达佩斯，先后在苏黎世高等技术学校、布达佩斯大学学习化学和数学。1927年在柏林大学作研究和教学工作，其后在汉堡大学任教。1930年，赴美国普林斯頓大学任讲师、教授，1933年起任普林斯頓大学高等研究院数学教授。在第二次大战期間，他参加了許多軍事方面的研究工作。战后仍然参与美国的軍事研究工作。1952年兼任美国原子能委員会总顾問委員会的委員，1955年离开普林斯頓大学，担任原子能委員会的委員。他是一貫地为美国战后的扩軍备战反动政策服务的科学家之一。

在二十年代和三十年代，馮·諾意曼的工作大体上在数学和物理学的理論研究領域內，他的研究工作涉及量子論、数理邏輯、各态历经理論、連續几何、算符环、集合理論等許多方面。三十年代后期，他从事理論流体力学的工作，并参与軍事方面的研究，开始对数学和物理的应用方面发生很大的兴趣。当时用已知的分析方法去解偏微分方程遇到許多困难問題，特别是他在研究駭波的相互作用(这和航空技术有关)等問題中，需要作极为大量的計算工作，这促使他研究計算技术的問題。第二次大战的后期，为了計算弹道，艾克特(Eckert)和毛彻萊(Mauchley)等首先設計建造了一台电子数字計算机——ENIAC(电子数字积分器和自动計算器)，与此同时，馮·諾意曼則着重研究計算机的最适当的組織形式的問題，并提出了运用电子計算机在解出需要大量計算工作的問題上面有很大潛力。在战后，馮·諾意曼及其合作者在普林斯頓

設計建造了一台实験性的电子数字計算机——JONICA，其中所发展的若干基本原理，成为現代高速电子数字計算机的重要依据。在設計建造当中，馮·諾意曼試图模拟人脑的已知的运算过程，这引起他研习神經学和精神病理学，并和这些方面的专家們討論。他曾参加了N.維納(N. Wiener)等在創立控制論过程中的討論，对控制論的形成有一些影响。在战后七、八年中，他在自动机理論、自动机和人脑思惟过程比較等方面，进行了一些研究，写了一些論文和报告。馮·諾意曼于1955年秋患癌症，1957年2月病故。《計算机和人脑》这本书，是患病前后所著，是他最后的一本著作。

除了計算技术和自动机理論之外，他对博奕論做了一些工作，曾和摩尔根斯坦(O. Morgenstern)合著《博奕理論和經济行为》一书(1948年版)*，在博奕論数学方法上有些成就，但在应用于經济活动的观点上面，以資产阶級經济学的边际效用理論为基础，则是完全謬誤的。

譯　者

* 中譯本：《竞賽論与經济行为》，王建华等譯，科学出版社1963年6月初版。